B. Nurmämmedow

ÝERASTY GIDROGAZODINAMIKA

Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin
«Nebit-gaz känlerini özleşdirmek we ulanmak»,
«Nebit we gaz guýularyny burawlamak»,
«Nebit-gaz geologiýasy» hünärleri boýunça okuw kitaby

Türkmenistanyň Bilim ministrligi tarapyndan hödürlenildi

Türkmen döwlet neşirýat gullugy
Aşgabat – 2012

UOK 550.8:378
N 87

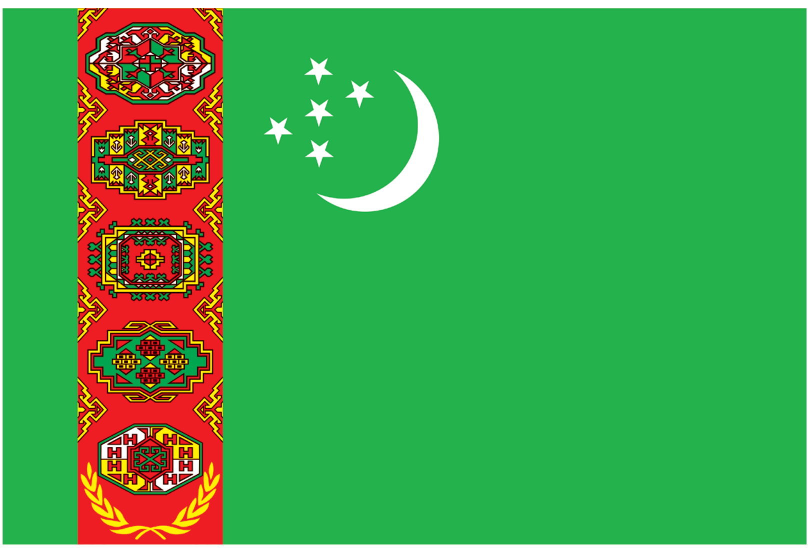
Nurmämmedow B.

N 87 **Ýerasty gidrogazodinamika.** Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin «Nebit-gaz känlerini özleşdirmek we ulanmak», «Nebit we gaz guýularyny burawlamak», «Nebit-gaz geologiýasy» hünärleri boýunça okuw kitaby. – A.: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2012.

TDKP №67, 2012 KBK 33.36 ýa 73

TÜRKMENISTANYŇ PREZIDENTI
GURBANGULY BERDIMUHAMEDOW

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET TUGRASY



TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET BAÝDAGY

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET SENASY

Janym gurban saňa, erkana ýurdum,
Mert pederleň ruhy bardyr köňülde.
Bitarap, garaşsyz topragyň nurdur,
Baýdagyň belentdir dünýäň öňünde.

Gaýtalama:
Halkyň guran Baky beýik binasy,
Berkarar döwletim, jigerim-janym.
Başlaryň täji sen, diller senasy,
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!

Gardaşdyr tireler, amandyr iller,
Owal-ahyr birdir biziň ganymyz.
Harasatlar almaz, syndyrmaz siller,
Nesiller döş gerip gorar şanymyz.

Gaýtalama:
Halkyň guran Baky beýik binasy,
Berkarar döwletim, jigerim-janym.
Başlaryň täji sen, diller senasy,
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!

GIRIŞ

Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň ýolbaşçylygy netijesinde biziň döwletimiz ägirt uly galkynyşa eýe boldy. Soňky ýyllarda biziň halkymyz uly ösüşleriň şaýady boldy. Birnäçe täze nebit-gaz känleri: Günorta Ýolöten, Osman we ş.m. açyldy. 2009-njy ýylda uzynlygy 7000 *km* bolan transcontinental Türkmenistan–Hytaý gazgeçirijisi, başga-da Döwletabat–Eýran gazgeçirijisi işe goýberildi.

2006-njy ýylyň 25-nji oktýabrynda bolup geçen Türkmenistanyň XVII Halk Maslahaty «Türkmenistanyň nebit-gaz senagatyny ösdürmegiň 2030-njy ýyla çenli döwür üçin» maksatnamasyny kabul etdi.

Maksatnamada nebitiň, gazyň çykarylyşyny we gaýtadan işlenilişini hem-de içerki we daşarky sarp edijilere ugradylyşyny, ýangyç serişdeleriniň çig mal binýadyny mundan beýläk-de ösdürmek üçin geçiriljek işleriniň esasy ugurlary we möçberleri kesgitlenildi. Nebit-gaz senagatynyň ähli ugurlaryny döwrebap hem-de ýokary derejeli dünýä talaplaryna laýyklykda ösdürmek çärelerini amala aşyrmak arkaly öňümizdäki 20 ýylyň dowamynda edilmeli işler bellenildi.

2030-njy ýyla çenli gazyň çykarylyşy 250 milliard m^3-a çenli, nebitiň çykarylyşyny bolsa 110 million tonna çenli artdyrmaly.

Ýerasty gidrogazodinamika – öýjükli we jaýrykly dag jynslarynda suwuklyklaryň, gazlaryň we olaryň garyndylarynyň hereketini öwrenýän ylym. Nebit, gaz, suwlar we olaryň garyndylary dag jynslaryndaky öýjüklerde we jaýryklarda ýerleşip, şolaryň içinde basyş tapawudy dörände, hereket edýärler, şol aýratyn herekete – filtrasiýa (süzülmek hereketi) diýip at berilýär. Filtrasiýa gazyň suwuklyklaryň umumy hereketinden (kanallardaky, turbalardaky we ş.m.) ep-esli tapawutlanýar, sebäbi öýjükleriň we jaýryklaryň ölçegi örän kiçi hem-de egrem – bugram bolup, ýüzleri büdür – südür bolýarlar.

1851-nji ýylda, fransuz inženeri Darsi, ýerasty suwlaryň filtrasiýasyny eksperiment esasynda barlag geçirip, dykyzlanmaýan suwuklygyň filtrasiýa tizligiň gidrawliki ýapgytlygyna çyzyklaýyn baglylygyny anyklaýar. Ol açyş şu günlere çenli Darsiniň kanuny hökmünde belli bolup durýar.

1857-nji ýylda, fransuz alymy Dýupýui, Darsiniň kanuny esasynda, tejribede duş gelýän meseleleriň biri bolan, guýynyň debitiniň formulasyny çykarýar. Ol Dýupýuiniň formulasy diýip gidrodinamikada tanalýar.

Buýesinesk, Forhgeýmer, Slihter, Žukowskiý we başgalar ýerasty suwlaryň filtrasiýa teoriýasyna öz goşandyny goşýarlar.

Gaz gidromehanikasy ylmy ugur bolup, ýerasty nebit – XX asyryň 20-nji ýyllarynda, akademik L.S.Leýbenzonyň işleri esasynda döreýär.

Nebitli we gazly gatlaklardaky filtrasiýa teoriýasynyň ösmegine akademik S.A.Hristianowiç, professor B.B.Lapuk, W.I.Şelkaçew, A.H.Mirzadžanzade hem-de başgalaryň uly goşandy bardyr.

«Ýerasty gidrogazodinamika» – okuw sapagy hökmünde Moskwanyň dag akademiýasynda 1927–1928-nji ýyllarda, akademik Leýbenzon tarapyndan okadylýar. L.S.Leýbenzonyň okuwçylary professorlar W.I. Şelkaçew we B.B.Lapuk, 1949-njy ýylda birinji okuw kitabyny çap edýärler.

Ýerasty gidrogazodinamika – nebitli we gazly ýataklaryndan işläp çykarmagyň esasy bolup, nebit-gaz fakultetleriniň okuw meýilnamasynda profile dogry gelýän sapaklaryň biri bolup durýar.

Okuw kitaby taýýarlananda edebiýatda görkezilen awtorlaryň işleriniň käbir bölümleri terjime edilip ulanyldy.

Şu okuw kitaby türkmen dilinde ilkinji okuw kitaby bolup, «Nebit-gaz känlerini özleşdirmek we ulanmak», «Nebit we gaz guýularyny burawlamak», «Nebit-gaz geologiýasy» hünärlerini öwrenýän talyplara hödürlenilýär. Okyjylar tarapyndan beriljek teklipler we bellikler, onuň hilini gowulandyrmaga kömek eder diýip awtor ynanýar we şolara minnetdarlyk bilen garaşýar.

I. DARSINIŇ FILTRASIÝA ÜÇIN ÇYZYKLAÝYN KANUNY WE ONY ULANMAK ÇÄGI

1.1. Nebitiň we gazyň kollektorlary

Nebit we gaz ýataklaryndaky gatlagyň öýjüklerini, köweklerini we jaýryklaryny dolduryarlar.

Dag jynslarynyň birnäçesi köp sanly uly öýjükli bolup nebitiň we gazyň rezerwuary hökmünde olar guýa tarap ýol görkeziji bolup durýar. Dag jynslarynyň birnäçesinde bolsa köp sanly öýjükler bolsa-da, olaryň ölçegleri kiçi bolany sebäpli nebitiň hereketi örän pes bolýar (toýunlar, slanesler we başg.).

Dag jynsynyň goşulan boşluklarynyň göwrüminiň dag jynsynyň umumy göwrümine (geometriki göwrümine) bolan gatnaşygyna öýjüklik koeffisiýenti diýilýär:

$$m = \frac{V_0}{V} \cdot 100\%, \tag{I.1}$$

bu ýerde V_0 – hemme boşluklaryň goşulan göwrümi, V – dag jynsynyň umumy (geometriki) göwrümi.

Tebigatda dag jynslarynyň hemme boşluklary biri-biri bilen birigip bilmeýärler. Biri-biri bilen birigýän boşluklaryň goşulan göwrüminiň dag jynsynyň umumy göwrümine bolan gatnaşygyna açyk öýjüklik koeffisiýenti diýilýär.

Dag jynslarynyň öz içinden suwuklyklary we gazlary geçirijilik ukybyna pronisaýemost (syzyjylyk) diýilýär. Nebitli we gazly dag jynslary üçin absolýut, effektiw we otnositel syzyjylyk ukyby düşünjeleri girizilýär.

Dag jynsynyň içinden bir fazaly suwuklyk ýa-da gaz syzylyp geçende onda ol absolýut geçirijilik ukybyny häsiýetlendirýär.

Haçanda öýjükli sredanyň içinden birnäçe faza bir wagtda geçende olaryň biri üçin effektiw geçirijilik ukyby bolýar.

Effektiw geçirijiligiň absolýut geçirijiligine bolan gatnaşygyna otnositel geçirijilik diýilýär.

Gazyň ýa-da suwuklyklaryň sarp edilýän göwrüminiň, gatlagyň kese kesik F meýdanyna bolan gatnaşygyna filtrasiýa tizligi diýilýär:

$$v = \frac{Q}{F}. \tag{I.2}$$

Süzülmegiň orta tizligini kesgitlemek üçin süzülmek tizligini öýjüklik koeffisiýentine bölmeli:

$$V_0 = \frac{v}{m}. \tag{I.3}$$

1.2. Filtrasiýanyň (süzülmegiň) esasy kanuny – Darsiniň kanuny

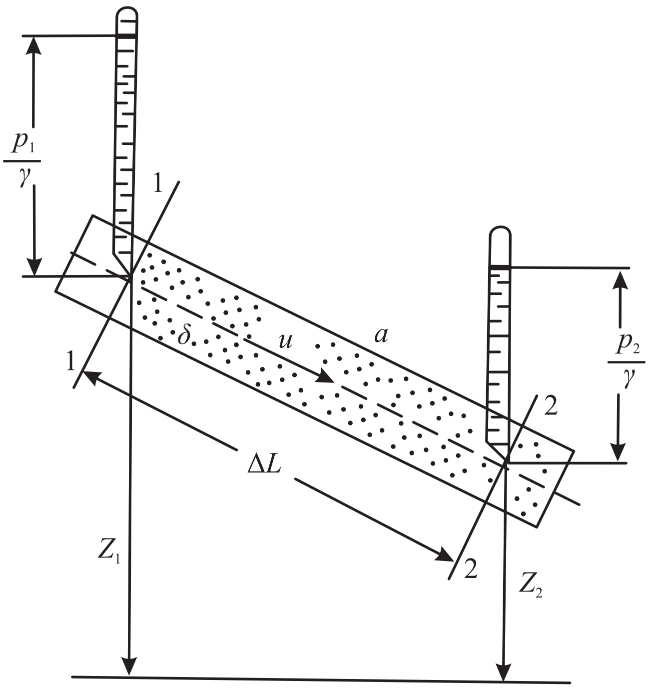
Filtrasiýa teoriýasynyň birinji kanuny bolan Darsiniň kanuny dykyzlanmaýan suwuklygyň sarp edilýän göwrüminiň gidrawliki ýapgytlygyna çyzyklaýyn baglylygyny aňladýar (*1-nji surat*):

$$Q = C_f \frac{H_1 - H_2}{\Delta L} F, \tag{I.4}$$

bu ýerde C_f – süzülme koeffisiýenti, ΔL – sütünjik görnüşli dag jynsynyň uzynlygy,

$$i = \frac{H_1 - H_2}{L} \text{ – gidrawliki ýapgytlyk.} \tag{I.5}$$

Süzülme koeffisiýenti öýjükli sredanyň we ony doldurýan flýuidleriň häsiýetnamalaryna bagly bolup durýar. Oňa dag jynsynyň dänejikleriniň ölçegi, şekili (formasy), ýüzüniň büdür-südürligi we suwuklygyň şepbeşikligi täsir edýär.



1-nji surat. Gatlagyň modeliniň shemasy

Filtrasion tizlikler kiçi bolany sebäpli, Bernulliniň deňlemesindäki üçünji agzasyna $\left(\frac{\alpha v^2}{2g}\right)$ biperwaý garap uzynlygy ΔL bolan gatlagyň modelinde basyş badynyň ýitgisini kesgitlesek onda:

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + Z_1, \tag{I.6}$$

$$H_2 = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2,$$

bu ýerde Z_1 we Z_2 – modeliň gyraky nokatlarynyň geometriki beýikligi, P_1 we P_2 – şol nokatlardaky basyş; γ – suwuklygyň udel agramy.

Onda basyş badynyň ýitgisini ýazyp bolar:

$$\Delta H = H_1 - H_2 = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + Z_1 - Z_2 = \frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z, \tag{I.7}$$

bu ýerde $(P_1 - P_2)$ – basyş ýitgisi

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2.$$

Şeýle-de gidrawliki ýapgytlygy aşakdaky görnüşde hem ýazyp bolar:

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{\frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z}{\Delta L} = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta P + \gamma \Delta Z}{\Delta L}. \tag{I.8}$$

Gorizontal gatlak üçin $Z_1 = Z_2$ we $\Delta Z = 0$.

Onda Darsiniň kanunyny şeýle görnüşde ýazmak mümkin:

$$Q = \frac{C_f}{\gamma} \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot F. \tag{I.9}$$

Differensial görnüşinde şeýle bolar:

$$v = \frac{Q}{F} = -\frac{C_f}{\gamma} \cdot \frac{dP}{dL}, \tag{I.10}$$

bu ýerde $\frac{dP}{dL}$ – basyşyň gradiýentiniň bahasy.

Bellik: – filtrasion tizliginiň basyşyň peselýän ugruna ösýändigini aňladýar.

Diýmek, Darsiniň kanunyna laýyklykda filtrasion tizlik basyş gradiýentine proporsional bolmaly.

Eger-de

$$C_f = \frac{K}{\mu} \cdot \gamma \tag{I.11}$$

göz öňünde tutsak, onda

$$v = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{dP}{dL}. \tag{I.12}$$

1.3. Darsiniň filtrasiýa üçin çyzyklaýyn kanunynyň ulanmak çägi

Süzülmek tizligi uly bolmadyk ýagdaýynda suwuklygyň öýjükli sredadaky hereketi Darsiniň kanunyna laýyk gelýär.

Süzülmek tizligi ulalanda suwuklykda döreýän inersion güýçler ösýär we päsgel güýçleriň derejesine ýetýär. Bu ýagdaýdaky suwuklygyň hereketi Darsiniň kanunyna laýyk gelip bilmeýär.

Ýerasty gidrawlikada Darsiniň kanunynyň çägini kesgitlemek üçin R_e kriteriýasy hasaplanylýar. N. N. Pawlowskiý R_e sanyny kesgitlemek üçin şu formulany hödürleýär.

$$R_e = \frac{vd_e\rho}{\mu(0,75m + 0,23)}, \tag{I.13}$$

bu ýerde v – süzülmek tizligi, ρ – suwuklygyň dykyzlygy, d_e – derňew esasynda kesgitlenen fraksiýaň effektiw diametri, m – öýjüklik koeffisiýenti, μ – şepbeşiklik koeffisiýenti.

N. N. Pawlowskiň barlaglarynyň esasynda:

$$7,5 \le R_e \le 9.$$

Eger-de ýokardaky hödürlenen formulalar bilen hasaplanan R_e sany 7,5-dan az bolsa, onda suwuklygyň öýjükli sredadaky hereketi Darsiniň kanunyna laýyk gelýär. Hasaplanan R_e sany 9-dan ýokary bolsa, onda bu ýagdaýdaky suwuklygyň hereketi Darsiniň kanunyna laýyk gelmeýär.

W. I. Şelkaçewyň R_e sanyny kesgitlemek üçin aşakdaky formulany hödürleýär.

$$R_{e_e} = \frac{10\sqrt{k} \cdot \rho}{m^{2,3}\mu}, \tag{I.14}$$

bu ýerde k – geçirijilik koeffisiýenti.

W. I. Şelkaçewyň barlaglary esasynda: $1 \le R_e \le 12$

Akademik M. D. Millionşşikowyň barlaglary esasynda:

$$R_{e_e} = \frac{v\sqrt{\dfrac{k}{m}} \cdot \rho}{\mu}, \tag{I.15}$$

$$0,022 \le R_e \le 0,29.$$

Öýjükli sredada suwuklygyň hereketi Darsiniň kanunynyň ulanmak çäginden daşary geçýän bolsa, onda süzülmek tizligi v bilen basyş dP/dL gradiýentiniň arasyndaky baglanyşyk aşakdaky iki agzaly formula laýyk gelýär.

$$-\frac{dP}{dL} = av + bv^2, \tag{I.16}$$

bu ýerde $$a = \frac{\mu}{k}; \qquad b = \frac{12 \cdot 10^{-3}\rho d_e^2}{mk^{3/2}}$$

Ý. M. Minskiniň tejribesi esasynda.

Süzülmek tizligi kiçi bolan ýagdaýynda $\alpha v >> bv^2$, onda formulanyň ikinji agzasyna, biperwaý garamak bolar, şol bir wagtda formula Darsiniň kanunyna öwrüler. Süzülmek tizligi uly bolanda $\alpha v << bv^2$ formulany şu görnüşde ulanyp bolar:

$$-\frac{dP}{dL} = bv^2. \tag{I.17}$$

Ýokarda aýdylyşy ýaly, hasap edilen Reýnoldsyň bahasy onuň kritiki bahasyndan ýokary bolsa $R_e > Re_{kr}$, onda gatlakdaky filtrasion akym Darsiniň kanunyna boýun egmeýär.

Reýnoldsyň bahasy uly bolan ýagdaýynda J. Dýupýui we F. Forhgeýmer iki agzaly filtrasion deňlemäni ulanmagyny hödürleýärler:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K} \cdot v + \beta \cdot \frac{\rho}{\sqrt{K}} \cdot v^2, \tag{I.18}$$

bu ýerde β – goşmaça constanta, öýjükli sreda üçin eksperiment esasynda kesgitlenýär.

Deňlemäniň birinji agzasy hereketdäki suwuklygyň şepbeşikliginiň hasabyna döreýän basyş ýitgisini aňladýar.

Deňlemäniň ikinji agzasy bolsa inersion güýçleriň ösmeginiň hasabyna döreýän ýitgi.

1.4. Gatlak energiýasy. Nebit we gaz ojaklarynyň düzgünleri

Nebit gatlagynyň guýular bilen birlikde özara baglanyşykly gidrodinamiki ulgamy düzýändigini praktika we teoriýa arkaly belli edilen. Şonuň bilen bir hatarda nebit çykaryjy guýularyň täsiri gatlagyň diňe nebitdoýgunly bölegine täsir etmän, ony gurşap alan zarply suw ulgamynyň çetine çenli ýaýraýar.

Nebitiň guýularyň düýbüne tarap akymyna täsir edýän gatlak energiýasynyň çeşmeleri bolup nebit ýatagyny gurşap alan onuň suwly böleginiň basyşynyň energiýasy, erkin we basyşyň peselmesi netijesinde nebitden bölünip aýrylýan ergin gazyň energiýasy, gatlagyň we suwuklygyň maýyşgaklygynyň energiýasy, nebitiň özüniň grawitasion güýji bilen şertlenen energiýa bolup hyzmat edýär.

Nebit ojagynyň özleşdirilýän döwründe gatlak energiýasynyň agdyklyk edýän görnüşiniň ýüze çykmasyna ojagyň iş düzgüni diýilýär.

Nebitiň gatlak boýunça energiýanyň haýsy görnüşiniň täsiri esasynda hereket edip guýulara gelip düşýändigine baglylykda ojagyň iş düzgünleriniň aşakdaky görnüşli atlandyrylýarlar: suwuň basyşynyň energiýasy, suwuň basyşynyň maýyşgak energiýasy, gazyň basyşynyň energiýasy, ergin gaz we grawitasion iş düzgünleri.

Gatlagyň iş düzgüni tebigy şertler hem-de ojagy özleşdirmegiň we ulanmagyň emeli usulynda döredilýän şertler esasynda döräp biler.

Gatlakdan suwuklygyň alnyp çykarylýan mukdarynyň depginine we ojaklary özleşdirmegiň dowamynda geçirilýän emeli çärelere (gatlaga işçi agentler bile täsir etme we beýleki usullara) baglydyr.

Suwuň basyşynyň energiýasynyň iş düzgüni. Bu düzgün nebitiň gatlak boýunça akymynyň nebit çykaryjy guýulara gelip düşmegini ojagy gurşap alan çetki we daban suwlaryň basyşynyň energiýasy (bady) esasynda amala aşyrylýan we ojakdan çykarylýan suwuklygyň öwezini suw doldurýan bolsa ýüze çykarýar. Nebit ojaklary bu iş düzgüninde özleşdirilende gatlagyň basyşy ilki pese gaçyp, wagtyň geçmegi bilen, suwuklygyň ojaklardan çykarylyşynyň durnuklaşan ýagdaýynda basyşyň peselişi hem durnuklaşýar. Eger-de guýularyň düýbündäki (zaboýundaky) basyş üýtgedilmän saklanylsa, onda bu iş düzgüninde basyşyň peselmesiniň depgininiň durnuklaşmagy bilen baglylykda guýularyň debitleri hem uzak wagtyň dowamynda durnukly saklanylýarlar. Şunuň bilen bir hatarda gatlagyň basyşy tä doýgunlyk basyşdan pese düşýänçä gaz faktory hem özüniň durnuklylygyny saklaýar.

Suwuň basyşynyň maýyşgak energiýasynyň iş düzgüni. Bu iş düzgüni suw basyşynyň energiýasynyň iş düzgüniň görnüşleriniň biri bolup, suwuklyk nebit çykaryjy guýulara diňe çetki suwlaryň basyşynyň energiýasy esasynda gelip düşmän, ol suwuklygyň (nebitiň we suwuň) we dag jynsynyň maýyşgaklyk häsiýetleriniň hasabyna hem amala aşýar.

Guýulary ulanmagyň ilkinji döwründe basyşyň has köp pese gaçmagy – bu düzgüniň esasy aýratynlygydyr. Ojagy özleşdirmegiň dowamynda ondan çykarylýan suwuklygyň mukdary durnukly bolan ýagdaýynda basyşyň peselişiniň depgini hem kemelýär. Guýularyň düýbündäki basyşyň durnukly saklanan ýagdaýynda olaryň debitleri özleşdirmegiň ilkinji pursatlarynda pese düsüp, soň olaryň wagt boýunça üýtgeýän egri çyzygy ýapgyt häsiýete eýe bolýar, gaz faktory bolsa suw basyşynyň energiýasynyň iş düzgüninde bolşy ýaly, gatlagyň basyşy tä doýgunlyk basyşdan pese düşýänçä özüniň durnuklylygyny saklaýar. Ojagyň bu iş düzgüni maýyşgak sygymlylygynyň gory ýokary bolan uly suwdoýgunly meýdanynyň bar bolan gatlaklar bilen baglanyşyklydyr.

Gaz basyşynyň energiýasynyň iş düzgüni. Özüniň ýokarky böleginde «gaz telpegi» diýlip atlandyrylýan erkin gazyň toplumyny saklaýan nebit ojagyndan önüm alnanda ondaky basyş peselip başlaýar. Basyşyň peselmegi «gaz telpeginiň giňelmegine we giňelen gazyň nebiti ojagyň aşaky bolegine itermegine getirýär.

Eger-de gatlak boýunça nebitiň guýularyň düýbüne gelip düşmeginde esasy hereketlendiriji güýç bolup «gaz telpeginiň» giňelmegi we erkin gazyň basyş güýji (bady) hyzmat edýän bolsa onda bu nebit ojagy gaz basyşynyň energiýasynyň iş düzgüninde özleşdirilýär diýilýär. Gazyň şepbeşikliginiň nebitiňkä garanda has az bolmagy onuň gaz – nebit kontaktyna golaý ýerleşen guýulara çalt gelip düşmegine getirýär. Şunlukda, gaz faktory (1 m^3 nebit bilen çykarylýan gazyň göwrümi) artýar. Munuň özi «gaz telpeginiň» gazynyň energiýasynyň çalt sarp edilmegine we erkin gazyň iteriji güýjüniň netijeliliginiň peselmegine getirýär.

Ergin gaz iş düzgüni. Ojagyň bu iş düzgüninde esasy hereketlendiriji güýç bolup nebitdäki ergin gaz hyzmat edýär. Nebit ojagy işe girizilmezinden öň nebit we gaz gatlakda bitewi termodinamik ýagdaýynda ýerleşendir. Eger-de nebit ojagy «gaz telpegini» saklamaýan bolsa we ojagyň özleşdirilmegine täsir edip biljek suw basseýni ýok bolsa, onda ojakdan nebitiň çykarylyp başlan pursadyndan başlap ondaky basyş peselip, doýgunlyk basyşdan (gazyň nebitde ergin görnüşde bolan basyşy) aşak düşse gazyň bölekleri nebitiň düzüminden çykyp başlaýar. Nebitiň düzüminden çykan gazyň bir bölegi giňelip nebiti öýjükli giňişlikden gysyp çykaryp ony pes basyşly zolaga – guýularyň düýbüne hereketlendirse, beýleki bölegi ýokary tizlikde hereket edip nebiti özi bilen birlikde guýulara getirýär.

Nebit ojagynyň bu iş düzgüniniň özleşdirilýän wagtynda gatlagyň basyşy çalt pese düşýär, gaz faktory bolsa ilki artyp iň ýokary derejä (maksimuma) ýetýär we soň peselip başlaýar. Şunuň bilen baglanyşyklylykda ergin gazyň gory çalt sarp edilýär. Bu düzgüniň netijeliligi pesdir, ojagyň nebit berijilik koeffisiýenti 0,15–0,3-den geçmeýär.

Agyrlyk güýjüniň (grawitasion) iş düzgüni. Nebit gatlagynyň potensial energiýasynyň görnüşleriniň biri hem agyrlyk guýji bilen baglanyşyklylykdaky energiýadyr. Ähli nebit saklaýjy dag jynslary kese tekizlige käbir burç bilen ýapgytlanandyr. Şunuň bilen baglanyşyklylykda ojagy özleşdirmegiň dowamynda nebit agyrlyk güýjüniň täsiri esasynda gatlaklaryň gurluşy boýunça aşaklygyna süýşmäge ymtylýar. Nebiti özünde saklaýan gatlagyň ýapgyt burçy näçe ýokary bolsa ondaky nebit şonça-da agyrlyk güýjüniň ýokary bolan energiýasyna eýedir. Käbir halatlarda nebiti guýulara tarap hereketlendiriji ýeke-täk güýç bolup agyrlyk güýji hyzmat edýär.

Eger-de nebit ojagynyň iş düzgüninde agyrlyk güýjüniň energiýasy agdyklyk edýän bolsa, onda ol ojak grawitasion iş düzgüninde özleşdirilýär diýilýär.

Nebit çykarmagyň tejribesinde ojagy özleşdirmegiň bütin dowamynda şol bir iş düzgüninde ulanylýan ojaklar az duş gelýärler. Köplenç, ojaklar gatyşyk iş düzgüninde özleşdirilýärler.

II. ÜZNÜKSIZ FILTRASION AKYMYŇ DEŇLEMESI

Deformirlenýän öýjükli sredada gysylýan, bir jynsly flýuid üçin, üzülmesiz filtrasion akymyň deňlemesini çykaralyň. Ol öýjükli sredanyň elementar göwrümleýin massanyň balansynyň deňlemesi bolup durýar. Öýjükli sredada elementar göwrüm diýip – gapdallary *dx, dy, dz* bolan parallelepipedi göz öňüne getireliň. Parallelepipediň «ab» gapdalynyň merkezindäki «*M*» nokadyň koordinatalary *x, y, z* diýip alarys. Onda parallelepipediň «$a'b'$» gapdalynyň merkezindäki «*M*» nokadyň koordinatalary $(x-dx)$, *y, z* bolup durýar. Wagtyň *dt* aralygynda şol elementar göwrümiň «*ab*» gapdalyndan akyp girýän flýuidiň massasy deň (*1-nji surat*):

$$(PW_x)_{ab}\, dy\, dz\, dt,$$

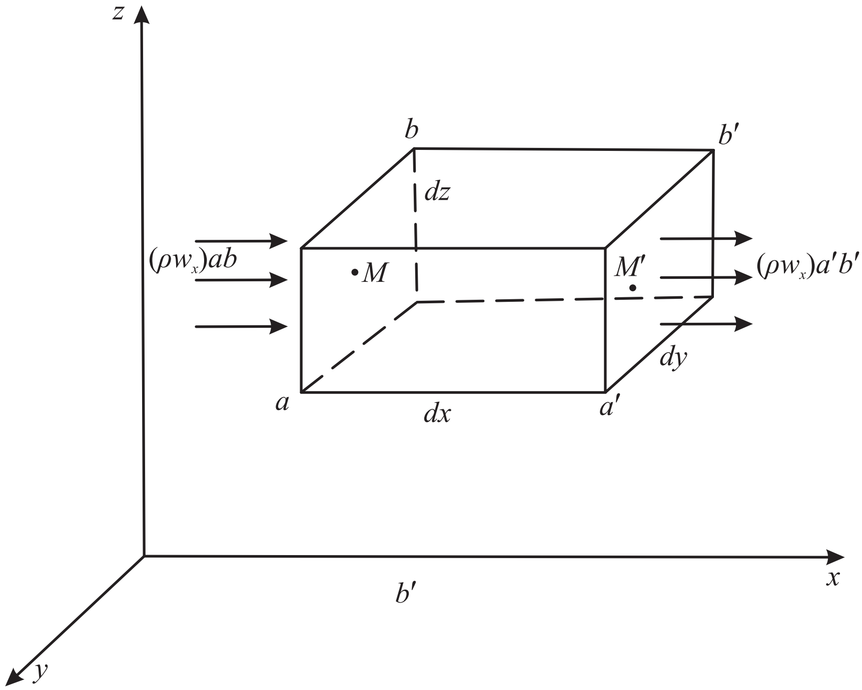
elementar göwrümiň kiçi bolanlygy sebäpli, akyp girýän we çykýan flýuidiň dykyzlygy, hem-de filtrasion tizligi onuň «$a'b'$ $a'b'$» gapdallarynda deň bolup, *M* we *M'* nokatlardaky bahasyna laýyk gelýär. $a'd'$ gapdalyndan akyp çykýan flýuidiň massasy bolsa $(PW_x)_{a'b'}\, dy\, dz\, dt$ deň bolýar:

Flýuid «*ab*» gapdalyň *M* – nokadyndan $a'b'$ gapdalyň M' nokadyna geçende onuň *x* koordinatasynyň üýtgeýşi (bahasy) – *dx* kiçi bolany sebäpli, aşakdaky deňlemäni ýazyp bileris:

$$(\rho w_x)_{a'b'} = (\rho w_x)_{ab} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x}dx.$$

Onda wagtyň *dt* aralygynda «*ab*, $a'b'$» göwrümde, akym ugry *x* – oka ugrukdyrylanda, flýuidiň massasynyň üýtgeýşini ýazyp bileris:

$$\left[(\rho w_x)_{ab} - (\rho w_x)_{a'b'}\right]dydzdt = -\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x}dxdydzdt.$$



1-nji surat

Akym y we z oklara ugrukdyrylan diýip, flýuidiň massasynyň şol oklaryň ugruna görä üýtgeýşini hem tapyp bileris:

$$-\frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y}dxdydzdt \text{ hem-de } -\frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z}dxdydzdt.$$

Şeýlelikde, wagtyň dt aralygynda dx, dy, dz göwrüminde, flýuidiň umumy massasynyň üýtgeýşi (ýygnanyşy) bolar:

$$-\left[\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z}\right]dxdydzdt. \qquad \text{(II.1)}$$

Başga tarapdan hem seredilende bu öýjükli elementar göwrümde flýuidiň massasy:

$$M = pm\; dx\; dy\; dz,$$

bu ýerde «m» – gatlagyň öýjüklik koeffisiýenti.

Bu fiksirlenen $dx\; dy\; dz$ göwrümde şol dt wagtyň içinde, flýuidiň massasynyň üýtgeýşi:

$$\frac{dM}{\partial t}dt = \frac{\partial(\rho m)}{\partial t}dxdydzdt. \qquad \text{(II.2)}$$

(1) we (2) aňlatmalary deňläp we olary *dx dy dz dt* gysgaldyp üzülmesiz akym üçin deňlemäni ýazyp bileris:

$$-\left[\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z}\right] = \frac{\partial(\rho m)}{\partial t}. \qquad \text{(II.3)}$$

Soňky (3) deňlemäniň çep tarapyndaky aňlatmany gysga ýazyp bolýar we oňa filtrasion massalaýyn tizlik wektorlarynyň diwergensiýasy diýilýär, hem-de aşakdaky görkezilişi ýaly ýazylýar:

$$\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = diw(\overrightarrow{\rho w}). \qquad \text{(II.4)}$$

Şol sebäpli (3) deňlemäni başga görnüşinde hem ýazyp bolýar:

$$div(\overrightarrow{\rho w}) + \frac{\partial(\rho m)}{\partial t} = 0.$$

III. FLÝUIDLERIŇ WE ÖÝJÜKLI SREDANYŇ PARAMETRLERINIŇ BASYŞA BAGLYLYGY

Çykarylan differensial deňlemä (II.3) flýuidiň dykyzlygy ρ, şepbeşikligi M, gatlagyň öýjüklik we geçirijilik koeffisiýentleri «m» we «k» girýärler. Gatlakda basyşyň üýtgemegi bilen olaryň bahasy hem üýtgeýär.

Izotermik proses bolanda bir jynsly flýuidiň dykyzlygynyň basyşa baglylygy flýuidiň hal deňlemesine laýyk gelýär. Suwuklygyň kadalaşan filtrasiýasy döwründe onuň dykyzlygy basyşa bagly däl hem-de ol gysylmaýan suwuklyk diýip hasap etmek bolar (mümkin): onda ρ = const.

Gatlakda kadalaşmadyk prosesler geçýän döwründe, basyşyň peselmegi nebitiň göwrüminiň ulalmagyna getirýär we şol goşmaça güýç bolup nebiti çykarmaga kömek edýär.

Bu proseslerde suwuklygyň gysylyjylygyny hökmän hasaba almaly. Suwuklyk maýyşgak diýip hasap etsek, onda onuň gysylyjylygynyň kanuny aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$\beta_S = -\frac{1}{\beta_S}\frac{dV_S}{dP}, \tag{III.1}$$

bu ýerde V_S – suwuklygyň göwrümi, dV_S – basyşyň dp üýtgemegi bilen suwuklygyň göwrüminiň üýtgeýşi, β_S – suwuklygyň göwrümleýin gysylma koeffisiýenti.

$$V_S = \frac{M}{\rho} \quad \text{we} \quad dV_S = -\frac{Md\rho}{\rho^2},$$

onda:

$$\beta_S = \frac{Md\rho/\rho^2}{\left(M/\rho\right)dP} = \frac{d\rho}{\rho dP}, \tag{III.2}$$

bu ýerde $\frac{d\rho}{\rho} = \beta_S dP$.

Soňky deňlemäni $P_O - P$ we $\rho_O - \rho$ çäklerinde integrirlesek,

$$\int_{\rho_O}^{\rho} dP/\rho = \beta_S \int_{\rho_O}^{\rho} dP \tag{III.3}$$

onda

$$\ln\left(\frac{\rho}{\rho_O}\right) = \beta_S(P - P_O), \tag{III.4}$$

ýa-da

$$\rho = \rho_O e^{\beta_S(P - P_O)}. \tag{III.5}$$

Gatlakdaky basyşyň üýtgeýşi uly bolmadyk ýagdaýynda ($P - P_O = 10$ *MPa*) ρ basyşa göni baglanyşykly bolup,

$$\rho = \rho_O[1 + \beta_S(P - P_O)]. \tag{III.6}$$

Maýyşgaklyk modulyny girizip deňlemäni aşakdaky görnüşde hem hödürläp bolar:

$$\rho = \rho_O[1 + (P - P_O)/K_S]. \tag{III.7}$$

Gaz ýataklarynda gatlaklaryň basyşlary uly bolmadyk ýagdaýda (6–9 *MPa* çenli) hem-de gaz akymyndaky depressiýa pes bolanda (1 *MPa* çenli), şol gatlaklardaky gazy ideal hasap edip, onuň üçin gazyň halynyň Klaýperon-Mendeleýew deňlemesini ýazmak bolar:

$$\frac{P}{\rho} = RT, \qquad R = \frac{\overline{R}}{\mu}, \tag{III.8}$$

bu ýerde $\overline{R}$ – uniwersal gaz hemişeligi, $\overline{\mu}$ – gazyň molekulýar massasy.

Gatlagyň temperaturasy hemişelik bolanda:

$$T = T_{gat} = const \frac{P_{at}}{\rho_{at}} = R \cdot T, \tag{III.9}$$

bu ýerde ρ_{at} – atmosfera basyşdaky gazyň dykyzlygy onda ýokarda berlen iki aňlatmany deňläp ýazmak mümkin:

$$\rho = \rho_{at} \cdot \frac{P}{P_{at}}. \tag{III.10}$$

Bu görnüşdäki deňleme aşakda giňden ulanylýar, soňky wagtlar gatlak basyşy uly bolan (40–60 *MPa*) gaz ýataklaryna ýygy-ýygydan duş gelmek bolýar. Şolar käbir ýagdaýlarda uly depressiýada (15–30 *MPa*) ekspluatirlenýärler. Şu şertlerde diňe real gaz halynyň deňlemesini ulanmak bolar:

$$\frac{P}{\rho} = ZRT. \tag{III.11}$$

Z aşa gysylyjylyk koeffisiýenti ol real gazyň ideal gazyň kanunyndan gyşarmasyny hasaba alýar we bellibir gaz üçin getirme basyş hem-de getirme temperatura bagly bolýar.

$$Z = Z\,(P, T). \tag{III.12}$$

Bu koeffisiýentiň bahasyny Braunyň grafiklerinden kesgitlemek bolar. Onuň üçin getirme basyş we getirme temperatura hasaplanylýar:

$$P_g = \frac{P}{P_{kr.gaz}}, \qquad T_g = \frac{T}{T_{kr.gaz}}, \tag{III.13}$$

bu ýerde $P_{kr.gaz}$, $T_{kr.gaz}$ – dürli komponentlerden durýar tebigy gazyň kritiki basyşy we temperaturasy.

Real gazyň izotermiki filtrasiýasy geçende onuň dykyzlygynyň basyşa baglylygy aşakdaky görnüşe eýe bolar:

$$\rho = \rho_{at} Z(P_{at}) \frac{P}{P_{at} Z(P)}. \tag{III.14}$$

Gatlakdaky basyşyň az üýtgeýän ýagdaýynda hemişelik temperaturada *Z*(*P*) basyşa baglylygyny çyzyklaýyn diýip şu görnüşde ýazyp bolar:

$$Z = Z_O[1 - a_z(P_O - P)]. \tag{III.15}$$

Eger-de basyşyň üýtgeýşi uly möçberde bolsa onda *Z*(*P*) basyşa baglylygy eksponensial bolar we

$$Z = Z_O e^{-a_Z(P_O - P)}, \tag{III.16}$$

bu ýerde a_z – konstanta saýlama usul bilen tapylýar.

Nebitiň we gazyň şepbeşiklik koeffisiýentleri basyşyň ulalmagy bilen ösýändigini eksperimentler görkezýär. Gatlakdaky basyşyň üýtgeýşi ep-esli derejede bolanda onda nebitiň we tebigy gazyň şepbeşikliginiň basyşa baglylygy eksponensial görnüşinde bolar:

$$\mu = \mu_O e^{-a_\mu(P_O - P)}. \tag{III.17}$$

Gatlakdaky basyşyň üýtgeýşi az derejede bolanda ol baglylyk çyzyklaýyn häsiýete eýe bolar:

$$\mu = \mu_O[1 - a_\mu(P_O - P)], \tag{III.18}$$

bu ýerde μ_O – fiksirlenen P_O – basyşdaky şepbeşiklik, a_μ – nebitiň ýa-da gazyň düzümine bagly eksperiment esasynda tapylýan koeffisiýent.

Indi öýjüklik koeffisiýentiniň basyşa baglylygyna seredeliň.

Öýjüklik gatlaga üstünden täsir edýän dag jynslarynyň massasynyň döredýän basyşyna **dag basyşy** diýilýär P_d. Bu basyş nebit we gaz alnan döwründe üýtgemeýär diýlip hasap edip bolar.

$$P_d = \rho_d gH, \tag{III.19}$$

bu ýerde ρ_d – gatlagyň üstündäki dag jynslarynyň ortaça dykyzlygy, H – gatlagyň çuňlugy.

Bu basyş (P_g) gatlagyň skeletindäki naprýaženiýe (dartgynlyk güýji) hem-de suwuklykdaky basyşyň P güýji bilen deňlenýär.

$$P_{dag} = (1 - m)\sigma + mP, \tag{III.20}$$

bu ýerde σ – öýjükli sredanyň skeletindäki hakykat naprýaženiýe (dartgynlylygy).

Basyş peselende dag jynsynyň (düzümindäki) däneleri gysýan güýç hem azalar, şol sebäpli ol dänejikleriň göwrümi ulalýar, öýjükleriň göwrümi bolsa kiçelýär. Jynslaryň deformasiýasy kiçi bolany sebäpli onuň öýjükligini basyşa bagly üýtgeýşini çyzyklaýyn diýip hasap etmek bolar.

Göwrümleýin maýyşgaklyk koeffisiýentini girizip, dag jynsynyň gysylyş kanunyny aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

$$\beta_S = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV_d}{dP}, \tag{III.21}$$

bu ýerde dV_d – element gatlakda öýjükleriň göwrüminiň üýtgeýşi.

Ýa-da öýjüklik koeffisiýentini girizip:

$$dm = \beta_c dP, \tag{III.22}$$

onda:

$$m = m_O + \beta_S(P - P_O) \tag{III.23}$$

m_O – $(P - P_O)$ basyşdaky öýjüklik koeffisiýenti.

Her dürli dag jynslary üçin göwrümleýin maýyşgaklyk koeffisiýenti laboratoriýa eksperimentler esasynda anyklanan we

$$\beta_S = (0,3 - 2,0) \cdot 10^{-10} Pa^{-1}. \qquad \text{(III.24)}$$

Gatlaklardaky basyşyň üýtgeýşi uly bolanda onuň öýjükliginiň üýtgeýşi aşakdaky deňlemä laýyk gelýär:

$$m = m_O e^{-a_m(P_O - P)}. \qquad \text{(III.25)}$$

Gatlagyň geçirijilik ukyby hem basyşa bagly bolup durýar.

Bu eksperimental esasynda tassyklanan.

Gatlakda basyşyň üýtgeýşi kiçi bolanda ol özara baglylyk çyzyklaýyn bolar:

$$K = K_O[1 - a_k(P_O - P)]. \qquad \text{(III.26)}$$

Uly bolanda weli-eksponensial bolar. Öýjükli gatlaklardan jaýrykly gatlaklarda onuň geçirijilik ukybynyň basyşa baglylykda üýtgeýşi has intensiw bolup durýar. Şonuň üçin jaýrykly gatlaklarda geçirijiligiň basyşa baglylygyny hasaba almak has hem zerurdyr.

IV. GYSYLMAÝAN SUWUKLYGYŇ DARSINIŇ KANUNY BOÝUNÇA KADALAŞAN FILTRASIÝASYNYŇ DIFFERENSIAL DEŇLEMESI

Üznüksiz akymyň, suwuklygyň we öýjükli sredanyň halynyň hem-de flýuidleriň hereketiniň deňlemelerini ulanyp gysylmaýan suwuklygyň Darsiniň kanuny boýunça kadalaşan filtrasiýasynyň differensial deňlemesini çykaralyň. Öýjükli sredanyň deformasiýasy hasaba alnanda (ρ = const, m = const) üznüksiz akymyň deňlemesi aşakdaky görnüşe eýe bolar:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \qquad \text{(IV.1)}$$

Suwuklygyň hereketine agram güýjüniň täsir ediş meýdanynda garalanda onda onuň Darsiniň kanuny boýunça geçýän kadalaşan hereketiniň deňlemelerini aşakdaky görnüşde ýazyp bolar:

$$w_x = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial P}{\partial x}; \quad w_y = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial P}{\partial y}; \quad w_z = -\frac{k}{\mu}\left(\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g\right). \qquad \text{(IV.2)}$$

Bu deňlemelerden dw_x/d_x, dw_y/d_y, dw_z/d_z proizwodnylaryny alarys:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial w_y}{\partial y} = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \qquad \text{(IV.3)}$$

we olaryň ululygyny üznüksiz akymyň deňlemesine girizip, ony ýazýarys:

$$-\frac{k}{\mu}\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right) = 0, \qquad \text{(IV.4)}$$

bu ýerden

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \qquad \text{(IV.5)}$$

$$\nabla^2 P = 0 \quad \text{ýa-da} \quad div\ \mathrm{grad}\ P = 0.$$

Bu deňleme gysylmaýan suwuklygyň deformirlenmeýän öýjükli sredada Darsiniň kanuny boýunça kadalaşan filtrasiýasynyň differensial deňlemesi bolup, ol Laplasyň deňlemesi diýip atlandyrylýar. Filtrasiýa teoriýasynda $\Phi\ (x, y, z)$ funksiýany girizmek amatly bolup, oňa filtrasiýa tizliginiň potensialy diýip atlandyryp ony taparys:

$$\Phi = \frac{k}{\mu}(P + \rho g z) \tag{IV.6}$$

we muny ýokarda ýazylan suwuklygyň kadalaşan hereketiniň deňlemelerine girizsek onda:

$$w_x = -\frac{\partial \Phi_x}{\partial x}; \quad w_y = -\frac{\partial \Phi_y}{\partial y}; \quad w_z = -\frac{\partial \Phi_z}{\partial z}.$$

Bu deňlemeleri koordinatalar boýunça differensirläp, üznüksiz akymyň deňlemesine filtrasiýa tizliginiň proizwodnylaryny girizip aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0.$$

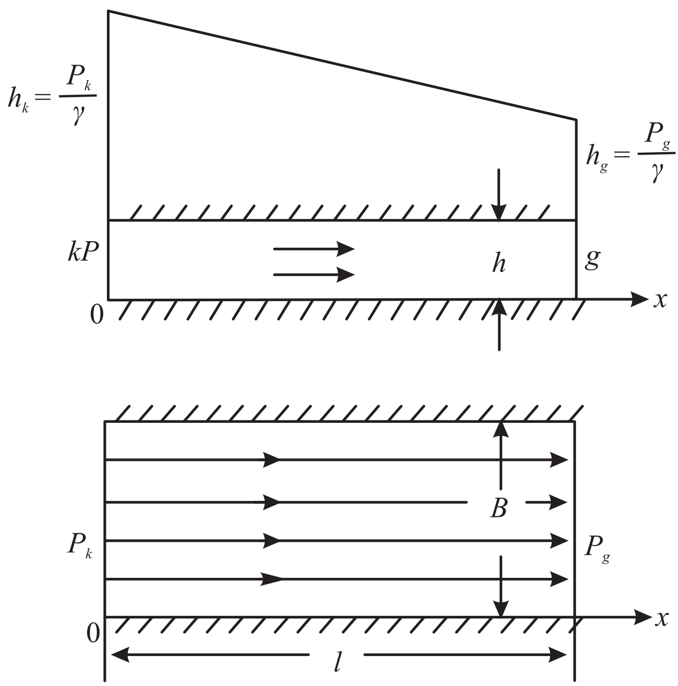
Şunuň bilen filtrasiýa tizliginiň potensialy Φ, edil basyş ýaly Laplasyň deňlemesine kanagatlanarly bolup durýar.

V. GATLAKDAKY BIR ÖLÇEGLI AKYMLAR. DÝUPÝUINIŇ FORMULASY

Bir ölçegli akymlara degişli:

1. Gönüçyzykly parallel syzylýan akym.
2. Tekiz radial akym.
3. Radial – sfera görnüşinde syzylýan akym.

Gönüçyzykly parallel syzylýan akym diýip, eger-de süzülmegiň tizlikleriniň wektorlary özara parallel bolanda aýdylýar. Suwuklyklaryň ýerasty gönüburçly drenaž galereýa süzülmesini mysal getirip bolar (*1-nji surat*).



1-nji surat

Onuň debiti ($m^3/g \cdot g$) deňdir.

$$Q = \frac{k}{\mu}\frac{P_k - P_g}{1}F, \qquad (V.1)$$

bu ýerde $F = Bh$ – gatlagyň kese kesiginiň meýdany.

Gatlagyň X koordinataly kese kesik meýdanyndaky basyş

$$P = P_k - \frac{P_k - P_g}{l}x. \qquad (V.2)$$

Suwuklygyň bölejikleriniň X aralygy geçýän wagty

$$t = \frac{m\mu}{k}\frac{l \cdot x}{(P_k - P_g)}. \qquad (V.3)$$

Tekiz radial akym bolan ýagdaýynda süzülmek tizliginiň wektory radius boýunça guýynyň merkezine gönükdirilýär.

Gatlagyň daş çägindäki basyş P_k = const, guýynyň töweregindäki basyş P_c = const bolanda, gatlagyň öýjüklik koeffisiýenti m we geçirijilik koeffisiýenti k bolsa, suwuklygyň hereketi Darsiniň kanunyna laýyk gelýän ýagdaýynda, Dýupi guýynyň debitini şu formula bilen kesgitleýär:

$$Q = \frac{2\pi kh(P_k - P_s)}{\mu \ln\frac{R_k}{r_c}}, \qquad (V.4)$$

bu ýerde h – gatlagyň galyňlygy (m).

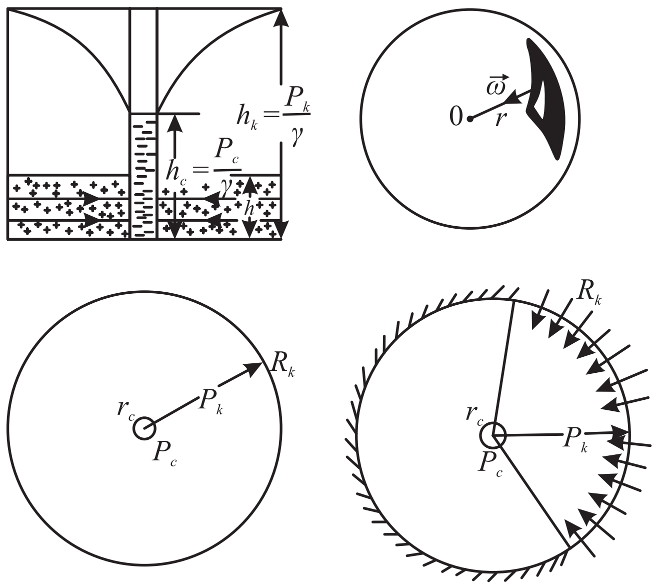
Tekiz radial akym bolan ýagdaýynda guýy bilen gatlagyň çäginiň arasyndaky basyşyň üýtgemegini, aşakdaky formulalar bilen kesgitläp bolar:

$$P = P_k - \frac{(P_k - P_c)}{\ln\frac{R_k}{r_c}}\ln\frac{R_k}{r_x}, \qquad (V.5)$$

$$P = P_c + \frac{(P_k - P_c)}{\ln\frac{R_k}{r_c}}\ln\frac{r_x}{r_c}, \qquad (V.6)$$

bu ýerde r_c – guýynyň radiusy, R_k – gatlagyň daş çäk radiusy.

Tekiz radial akym bolan ýagdaýynda, guýynyň töweregindäki basyşyň üýtgemegini depression çyzyk görnüşinde hem görkezip bolar (*2-nji surat*).



2-nji surat

Guýynyň debiti Q bilen depressiýanyň $\Delta P = P_k - P_c$ arasyndaky baglylygy indikator çyzyk görnüşinde hem görkezip bolar. Haçanda akym Darsiniň kanunyna laýyklykda hereket edende, ol gönüçyzyk görnüşinde bolýar.

$$Q = \eta \Delta P, \tag{V.7}$$

bu ýerde η – gatlagyň öndürijiliklilik koeffisiýenti.

Suwuklygyň bölejiginiň belli aralygy – r geçýän wagtyny hasaplamak hem bolar:

$$t = \frac{\pi h m}{Q}(r_0^2 - r^2) \tag{V.8}$$

$$t = \frac{m\mu \ln \frac{R_k}{r_c}}{2k(P_k - P_c)}(r_0^2 - r^2) \tag{V.9}$$

$$r = r_0 \text{ haçanda } t = 0.$$

Süzülmek tizliginiň wektory radial birleşýän nokada gönükdirilen bolanda, oňa radial – sfera görnüşinde syzylýan akym diýilýär.

VI. SUWUKLYGYŇ KADALAŞAN TEKIZ FILTRASIÝASY. GUÝULARYŇ INTERFERENSIÝASY. TEKIZ FILTRASIÝA TEORIÝASYNYŇ KOMPLEKS ÜÝTGEÝJILIKLI FUNKSIÝALARYŇ TEORIÝASY BILEN BAGLANYŞYGY

6.1. Guýularyň interferensiýasy. Superpozisiýa usuly

Umumy ýagdaýda, basyş we süzüjilik tizligi gatlakdaky nokadyň üç koordinatasyna baglydyr. Eger basyş we filtrasiýanyň tizligi diňe iki koordinata, her üçünji oka perpendikulýar tekizlikde bagly bolsa, onda tizlik we basyş meýdany birmeňzeş bolýar, şu ýagdaýda filtrasiýanyň akymy tekiz diýip atlandyrylýar. Bir jynsly hemişelik galyňlykly gorizontal gatlakda, bir ýa-da birnäçe gidrodinamiki kämilleşen guýular işlände, tekiz filtrasiýa akymy öz ýerini tutýar. Şu bölümde edil şeýle akymlara seredilýär.

Suwuklygy özüne ýygnaýan nokada – «stok» diýip atlandyrýarys. Suwuklygy özünden çykaryp daş töweregine bölýän nokada – «istoçnik» diýip atlandyralyň. Onda «stok» – ekspluatasion guýy, we «istoçnik» – sarp ediji guýa meňzeş diýip bolar. Gutarnyksyz gatlakda bir guýy stok işlände – akymyň süzüjiligi tekiz – radial bolýar we guýynyň merkezinden r – aralykdaky nokatda basyş şu formula bilen hasaplanylýar:

$$P = \frac{q\mu}{2\pi k}\ln r + c, \qquad \text{(VI.1)}$$

bu ýerde $q = \dfrac{Q}{h}$ – guýy-stokuň debiti, h – gatlagyň galyňlygy, C – integrirlemegiň hemişeligi.

Filtrasiýanyň tizliginiň potensialy «Φ» diýip, şu aňlatma diýeliň.

$$\Phi = \frac{kP}{\mu}. \tag{VI.2}$$

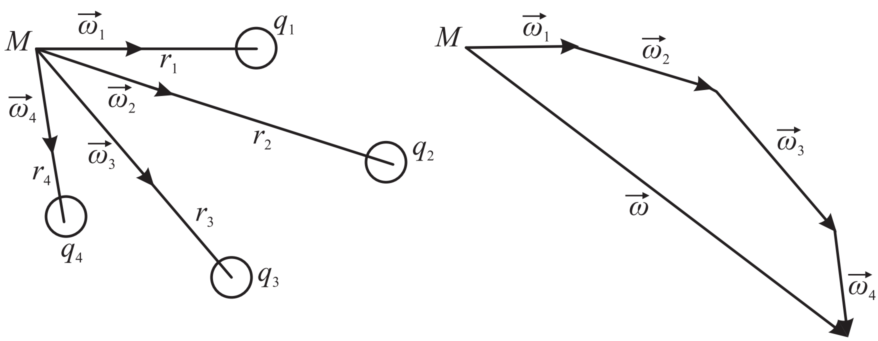
Basyşdan potensiala geçip, guýynyň merkezinden r aralykdaky nokadyň potensialynyň bahasyny alarys.

$$\Phi = \frac{q}{2\pi}\ln r + c. \tag{VI.3}$$

Istoçnigiň debitine (sarp ediji guýy) minus goýulýar. Gatlakda birnäçe guýy bilelikde işlände, gatlagyň islendik «M» nokadyndaky netijeleýji potensial her bir guýynyň Φ_1, Φ_2, ... potensiallaryň algebraik jemine deň diýmek mümkin.

$$\begin{aligned}\Phi_M &= \frac{q_1}{2\pi}\ln r_1 + \frac{q_2}{2\pi}\ln r_2 + \frac{q_3}{2\pi}\ln r_3 + ... + \\ &+ C = \frac{1}{2\pi}\sum_{i=1}^{n} q_i \ln r_i + C.\end{aligned} \tag{VI.4}$$

Şu ýagdaýda filtrasiýanyň tizligi geometriki jemlenip ýerleşdirilýär (*1-nji surat*). Bu usula superpozisiýa usuly diýilýär.



1-nji surat

Superpozisiýa usulyny ulanyp, iýmitlendiriş çägi örän daşlaşan gatlakda işleýän guýular topary üçin debiti ýa-da düýp potensialyny (soňundan, düýp basyşy) ýakynlaşan görnüşde hasaplamak mümkin. Iýmitlendiriş çägiň Φ_k potensialy belli hasap edilýär, çäkden beýleki guýulara çenli aralyk – birmeňzeş we takmynan, R-e deňdir diýip alynýar.

«M» nokady her guýynyň düýbünde yzygiderli ýerleşdirip, guýynyň sanyna deň sanly deňleme alarys. Hemişelik integrirleme, iýmitleniş çäginiň şertinde tapylýar. Debitleri ýa-da düýp potensiallary hasaplamak üçin gutarnykly deňlemeler ulgamy şu görnüşe eýe bolar:

$$\Phi_k - \Phi_{c1} = \frac{1}{2\pi}\left[q_1 \ln\frac{R_k}{r_{c1}} + q_2 \ln\frac{R_k}{r_{1-2}} + ... + q_n \ln\frac{R_k}{r_{c1n}}\right]$$

$$\Phi_k - \Phi_{c2} = \frac{1}{2\pi}\left[q_1 \ln\frac{R_k}{r_{1-2}} + q_2 \ln\frac{R_k}{r_{c2}} + ... + q_n \ln\frac{R_k}{r_{c2n}}\right] \quad \text{(VI.5)}$$

$$\Phi_k - \Phi_{cn} = \frac{1}{2\pi}\left[q_1 \ln\frac{R_k}{r_{1-n}} + q_2 \ln\frac{R_k}{r_{2-n}} + ... + q_n \ln\frac{R_k}{r_{cn}}\right], \quad \text{(VI.6)}$$

bu ýerde r_{ij} i – we j guýynyň merkeziniň arasyndaky uzynlyk.

Superpozisiýa usulyny şol ýa-da beýleki görnüşli iýmitlendiriş çägi çäklendirilen ýa-da geçirmeýän araçäkli gatlakda işleýän guýular üçin ulanmak mümkin. Emma real guýy bilen araçäkde hökmany şertleri döreýän beýleki şertleri ýerine ýetirmek üçin gatlagyň daşynda (fiktiw) guýyny girizmeli bolýarys. Soňundan çäklendirilmedik gatlakda birwagtda işleýän real we fiktiw guýulara seredýäris. Bu usul «otobraženiýe» usuly diýip atlandyrylýar. Ol diňe ýerasty gidrawlikada we gidromehanikada giňişleýin ulanyşa eýe bolman, eýsem, elektrogeçirijiligiň we magnetizmiň, elektrik teoriýalarynyň meseleleri işlenilende hem ulanylýar.

Eger ekspluatasion guýy çäkden «a» aralykda gönüçyzykly iýmitlendiriji çäkli gatlakda ýerleşse, onda fiktiw guýyny çägiň beýleki tarapynda «a» aralykda ýerleşdireliň we onuň debitini otrisatel hasaplalyň.

Şunlukda, işlendik «M» nokadyň potensialyny aşaky formulanyň kömegi bilen kesgitleýäris:

$$\Phi_M = \frac{q}{2\pi}\ln r_1 - \frac{q}{2\pi}\ln r_2 + C = \frac{q}{2\pi}\ln\frac{r_1}{r_2} + C. \quad \text{(VI.7)}$$

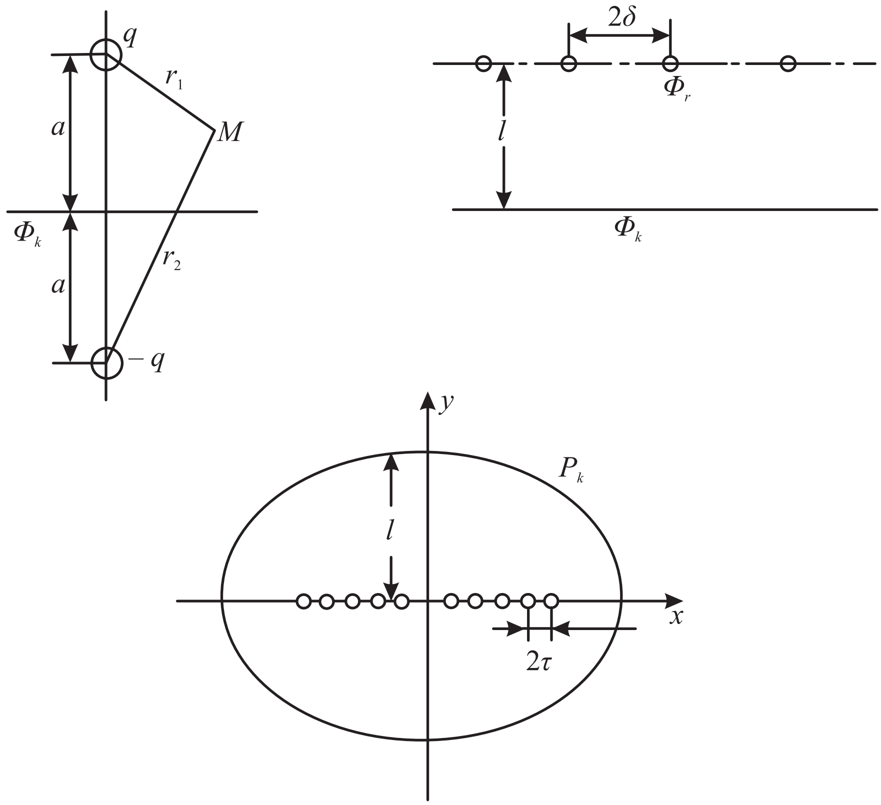
Iýmitleniş çäginde $r_1 = r_2$ we $\Phi = c = \Phi k$, onda guýynyň debiti aşakdaky formula bilen hasaplanylýar.

$$Q = \frac{2\pi h(\pi_k - \Phi_c)}{\ln\dfrac{2a}{r_c}} = \frac{2\pi_k kh(P_k - P_c)}{\mu \cdot \ln\dfrac{2a}{r_c}}. \qquad \text{(VI.8)}$$

«Otobraženiýe» usuly çäklendirilen kesişýän gönüçyzykly, geçirmeýän araçäkli gatlaklarda işleýän guýynyň debitini tapmak üçin hem ulanylýar. Şu usulyň kömegi bilen tegelek gatlakda eksentriki ýerleşen guýynyň debitini hasaplamak mümkin:

$$Q_{ekss} = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{\mu \cdot \ln\left[\dfrac{R_k}{r_c}\left[1 - \dfrac{\delta^2}{R_k^2}\right]\right]}, \qquad \text{(VI.9)}$$

bi ýerde δ – guýynyň merkezinden töwerek görnüşli gatlagyň merkezine çenli aralyk (eksentrisitet).



2-nji surat

Gönüçyzykly iýmitlendiriji çäkden L aralykda ýerleşen her bir guýynyň debiti (*2-nji surat*).

$$Q = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{\mu\left(\ln 2sh\frac{\pi_L}{\tau} + \ln\frac{\tau}{\pi r_c}\right)}, \qquad \text{(VI.10)}$$

bu ýerde τ – guýularyň arasyndaky aralygyň ýarysy.

Eger-de $L > \tau$ onda ýakynlaşan görnüşde kabul etmek mümkin.

$$\ln 2sh\frac{\pi_L}{\tau} = \ln\left(e^{\pi_1/\tau} - e^{-\pi_1/\tau}\right) \approx \frac{\pi_L}{\tau}, \qquad \text{(VI.11)}$$

onda

$$Q = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{\mu \cdot \left[\frac{\pi_L}{\tau} + \ln\frac{\tau}{\pi r_c}\right]} \qquad \text{(VI.12)}$$

R_k radiusly gatlakdaky, «n» guýudan düzülen tegelek batareýadaky bir guýynyň debiti şu görnüşe eýe bolar.

$$Q = \frac{2\pi h(\Phi_k - \Phi_c)}{\left[\ln\frac{R_k^n}{nr_c R_1^{n-1}}\left[1 - \frac{R_1^{2n}}{nr_c R_k^{2n}}\right]\right]} = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{\mu \cdot \ln\left[\ln\frac{R_k^n}{nr_c R_1^{n-1}}\left[1 - \frac{R_1^{2n}}{nr_c R_k^{2n}}\right]\right]}, \qquad \text{(VI.13)}$$

bu ýerde R_1 – batareýanyň radiusy.

Eger batareýadaky guýularyň sany köp bolsa (5 ýa-da 6), onda $(R_1/R_k)^{2n} << 1$ we bu aňlatmany birlik bilen deňeşdireniňde hasaba almazlyk hem mümkin, mundan başga-da $\frac{R_1}{nr_c} = \frac{\tau}{\pi r_c}$ çalyşsak, onda ýakynlaşan formulany alarys.

$$Q = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{\mu \cdot \left[n\ln\frac{R_k}{R_1} + \ln\frac{\tau}{\pi r_c}\right]}. \qquad \text{(VI.14)}$$

Eger-de ellips görnüşli gatlakda «n» guýy işleýän bolsa (*2-nj sur. ser.*), onda bir guýynyň debiti W. T. Mironenkonyň hödürleýän formulasy esasynda tapylýar:

$$Q = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)sh\beta ch\frac{\beta_k}{\tau}}{\mu \cdot sh(n\beta)\left[Arsh\frac{L}{n_1\tau} + \frac{1}{n}\ln\frac{\tau}{\pi r_c}\right]}, \qquad \text{(VI.15)}$$

bu ýerde β – aşakdaky deňlemeden tapylýar:

$$ch(2\beta) = 1 + \frac{\ln n}{(n-1)\ln\frac{\tau}{r_c}}, \qquad \text{(VI.16)}$$

bu ýerde X – guýynyň merkeziniň koordinatasy, L – ellipsiň kiçi ýarym oky, τ – guýynyň arasyndaky uzynlygyň ýarusy.

6.2. Köphatarly işleýän guýular üçin ekwiwalent filtrasion garşylyklar hasap usuly

Ýu. P. Borisowyň ekwiwalent filtrasion garşylyklar hasaplama usuly, guýularyň ýa-da köphatarly batareýanyň debitini hasaplamagyň usullarynyň biri bolýar.

n – guýyly zynjyryň debitiniň jemi deňdir.

$$Q^1 = \frac{2\pi khn(P_k - P_c)}{\mu \cdot \left[\frac{\pi_L}{\tau} + \ln\frac{\tau}{\pi r_c}\right]} = \frac{P_k - P_c}{\left[\frac{\mu_L}{2\tau khn} + \frac{\mu}{2\pi khn}\ln\frac{\tau}{\pi r_c}\right]}. \qquad \text{(VI.17)}$$

Filtrasiýanyň we Omuň kanunynyň arasyndaky analogiýasyny geçirip we göwrümleýin harçlanyşyň analogy – tok güýji bolup, basyşyň tapawudynyň analogy-elektrik potensiallarynyň bolýandygyny göz öňünde tutup, maýdalawjyda durýan aňlatmany filtrasiýanyň garşylygy diýip atlandyrmak mümkin. Ol filtrasiýanyň daşky garşylygyndan,

$$\rho = \frac{\mu_L}{2\tau khn} = \frac{\mu_L}{Bkh} \qquad \text{(VI.18)}$$

iýmitlendiriji çäkden uzynlygy L aralykda ýerleşen gönüburçly ýerasty galereýadan, iýmitlendiriji çäge çenli akymyň garşylygyny özünde görkezýän we

$$\rho' = \frac{\mu}{2\pi khn}\ln\frac{\tau}{\pi r_c} \qquad \text{(VI.19)}$$

$\frac{\tau}{\pi}$ – radiusly tekiz radial akymyň zolagyna suwuklyk ýakynlaşanda ýüze çykýan garşylygy aňladýan filtrasiýanyň içki garşylygyndan düzülýär. Formula bolsa şu görnüşe gelýär:

$$Q^1 = \frac{P_k - P_c}{\rho_1 + \rho^1}. \tag{VI.20}$$

Soňky formula gabat gelýän elektrik shemasy: Q – tok güýji, potensiallaryň tapawudy P_k, P, we ρ hem-de ρ' garşylykly iki yzygider birleşdirilen geçirijini özünde görkezýär (*3-nji surat*).

Eger gatlakda her haýsynda n sanly guýynyň üç setiri (zynjyry) bolsa, r_{c1}; r_{c2}; r_{c3} radiusly we düýpdäki basyş P_{c1}; P_{c2}; P_{c3} we debitiň jemi Q^{I}, Q^{II}, Q^{III} bolsa, onda ekwiwalent filtrasion garşylyklaryň shemasy şahalanan bolar, şeýle suwuklygyň umumy mukdary, iýmitlendiriji çäkden geçende, soňundan şahalanýar; birinji zynjyra Q^{I} debit sowulýar, galan suwuklyk aňry herekedini dowam etdirýär, ikinji zynjyra Q^{II} debiti sowulýar we ş.m.

Şu ýagdaýda filtrasiýanyň daşky garşylygy

$$\rho_1 = \frac{\mu L_1}{Bkh}; \quad \rho_2 = \frac{\mu L_2}{Bkh}; \quad \rho_3 = \frac{\mu L_3}{Bkh}, \tag{VI.21}$$

bu ýerde L_1 – iýmitlendiriji çäkden birinji guýular zynjyryna çenli aralyk, L_2 – birinji we ikinji zynjyryň arasyndaky uzynlyk, L_3 – ikinji we üçünji zynjyryň arasyndaky uzynlyk.

Içki garşylyk:

$$\rho_1^1 = \frac{\mu}{2\pi khn_1} \ln \frac{\tau_1}{\pi r_{c1}};$$

$$\rho_2^1 = \frac{\mu}{2\pi khn_2} \ln \frac{\tau_2}{\pi r_{c2}}; \tag{VI.22}$$

$$\rho_3^1 = \frac{\mu}{2\pi khn_3} \ln \frac{\tau_3}{\pi r_{c3}}.$$

Shemany hasaplamak Omuň we Kirhgofyň kanuny boýunça geçirilýär. Şu ýagdaýda näbellileriň sanyna deň algebraik çyzykly deňleme düzülýär.

Töwerekleýin guýularyň batareýasynyň debitiniň jemi hem şol formula boýunça hasaplanýar we daşky garşylyk aşaky görnüşde ýazylýar:

$$\rho = \frac{\mu}{2\pi kh}\ln\frac{R_k}{R_1}, \qquad \text{(VI.23)}$$

içki garşylyk bolsa üýtgemeýär we öňki görnüşde galýar. Şu ýagdaý üçin ekwiwalent filtrasion garşylyklar shemasy edil gönüçyzykly zynjyryňky ýaly bolar.

Birnäçe töwerekleýin batareýalar üçin (meselem üç) shemasy 3-nji suratda görkezilen. Su ýagdaýda filtrasion daşky garşylyk aşakdaky formulalar boýunça hasaplanýar:

$$\rho_1 = \frac{\mu}{2\pi kh}\ln\frac{R_k}{R_1};$$

$$\rho_2 = \frac{\mu}{2\pi kh}\ln\frac{R_1}{R_2}; \qquad \text{(VI.24)}$$

$$\rho_3 = \frac{\mu}{2\pi kh}\ln\frac{R_2}{R_3},$$

bu ýerde R_1, R_2, R_3 – batareýalaryň radiusy.

Içki garşylygyň formulasy öňküligine galýar.

Darsiniň kanunyna boýun egýär tekiz süzüjilikli akym derňelende, kompleks üýtgeýjilikli funksiýanyň teoriýasyny ulanmak mümkin.

Her bir tekiz süzüjilik akymy üçin akymyň häsiýetli funksiýasyny tapmak mümkin, ýa-da üýtgeýjiniň kompleks funksiýasy bolan kompleks potensialyny $F(z)$ tapmak mümkin

$$F(z) = \Phi(x, y) + i\psi(x, y), \qquad \text{(VI.25)}$$

bu ýerde (x, y) – tizligiň potensialy, $i\psi$ – akymyň funksiýasy.

Bu funksiýalar öz arasynda Koşi-Rimonyň deňlemesi bilen baglydyrlar:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x} = \frac{\partial\psi}{\partial y}; \quad \frac{\partial\Phi}{\partial y} = \frac{\partial\psi}{\partial x} \qquad \text{(VI.26)}$$

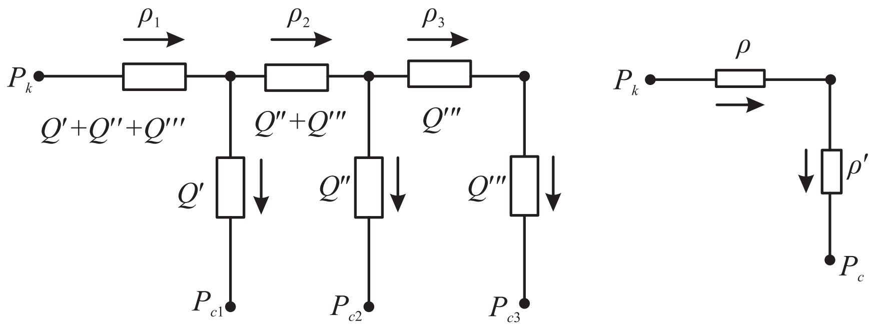
we Laplasyň deňlemesine boýun egýär:

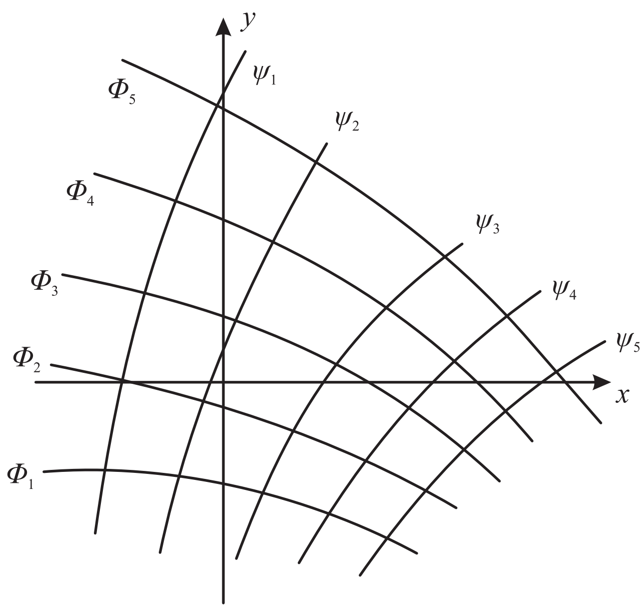
$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2\psi}{\partial x} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y} = 0; \qquad \text{(VI.27)}$$

$\Phi(x, y) = c$ deňleme izobara gabat gelýän ekwipotensiallar diýip hasaplanýar, sebäbi $\Phi = \frac{k}{\mu} \cdot P$ bolany üçin we $\psi(x, y) = c$.

Ekwipotensiallar we akym çyzyklary özara ortagonaldyrlar (*3-nji sur. ser.*).

Filtrasiýa tizliginiň proýeksiýasy koordinatlar okunda aşakdaky formulalar boýunça tapylýar





3-nji surat

$$\omega_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}; \quad \omega_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \tag{VI.28}$$

filtrasiýa tizligiň moduly

$$\omega = \left|\frac{dF}{dz}\right| = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}. \tag{VI.29}$$

Akymyň *S* çyzygynyň boýunda, suwuklygyň bölejikleriniň hereketiniň wagtyny şu formula boýunça hasaplamak mümkin

$$t = -m\int \frac{dx}{\frac{dF}{dx}} \tag{VI.30}$$

$z = x - yi$ bilen bir-birine kompleks üýtgeýji.

Eger haýsy hem çylşyrymly tekiz filtrasiýa akymy birnäçe ýönekeý akymyň üstüne goýmagyň netijesinde göz öňünde tutmak mümkin bolsa, onda çylşyrymly akymyň funksiýasynyň häsiýetnamasy superpozisiýa usuly boýunça ýönekeý akymlarynyň algebraik jeminiň häsiýetnamasyna deň.

VII. GIDRODINAMIKI KÄMILLEŞDIRMEGIŇ GUÝYNYŇ DEBITINE TÄSIRI

Eger guýy nebitli we gazly gatlagy doly galyňlygynda açsa hem-de düýbi açyk bolsa, emeli filtr bolmasa, onda nebit we gaz guýynyň doly töwerek gapdalyndaky meýdanyndan süzülip geçýär we oňa gidrodinamiki kämilleşen guýy diýilýär.

Suwuklygyň kämilleşen guýy akymy-tekiz süzülýän akymdyr. Eger-de guýynyň düýbi açyk emeli filtrsiz bolsa, ýöne gatlagy doly galyňlykda açman, bellibir «*b*» ululyga açsa, ýa-da guýy bilen gatlak arasyndaky arabaglanyşyk ekspluatasion kolonnada edilýän aýratyn deşijikler üsti bilen geçýän bolsa, onda suwuklygyň ýa-da gazyň süzülişi giňişleýin (üçölçegli) bolýar we oňa gidrodinamiki kämilleşmedik guýy diýilýär.

Kämilleşmedik guýynyň üç görnüşi bar.

1) gatlagyň açylyş derejesi boýunça gidrodinamiki kämilleşmedik – bu guýynyň düýbi emeli filtrsiz açyk bolýar, ýöne gatlagy doly galyňlykda açmaýar.

2) gatlagy açylyş häsiýeti boýunça gidrodinamiki kämilleşmedik – bu guýy nebitli we gazly gatlagy onuň basyrgasyndan etegine çenli doly açýar, ýöne guýy bilen gatlak arasyndaky arabaglanyşyk ekspluatasion kolonnada edilýän aýratyn deşijikler üsti bilen ýa-da ýörite emeli filtrler arkaly geçýär.

3) açylyş derejesi hem häsiýeti boýunça gidrodinamiki kämilleşmedik guýy.

Açylyş derejesi boýunça kämilleşmedik guýynyň debiti M.Masketiň formulasyndan hasaplanýar.

Eger-de radiusy $R_k \geq 1/2h$ bolsa

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu}\frac{P_k - P_c}{\xi} \qquad \text{(VII.1)}$$

bu ýerden

$$\xi = \frac{1}{2h}\left[2\ln\frac{4h}{r_c} - \varphi(\overline{h})\right] - \ln\frac{4h}{R_k}, \qquad \text{(VII.2)}$$

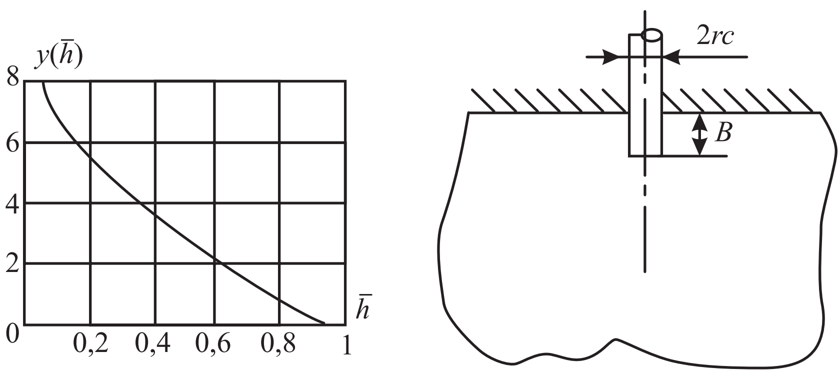
bu ýerde gatlagyň otnositel açylyşy $\overline{h} = b/h$, $\varphi(\overline{h})$ – funksiýa aşakdaky analitik aňlatma deňdir:

$$\varphi(\overline{h}) = \ln\cdot\frac{\Gamma(0,875\overline{h})\Gamma(0,125\overline{h})}{\Gamma(1-0,875\overline{h})\Gamma(1-0,125\overline{h})}, \qquad \text{(VII.3)}$$

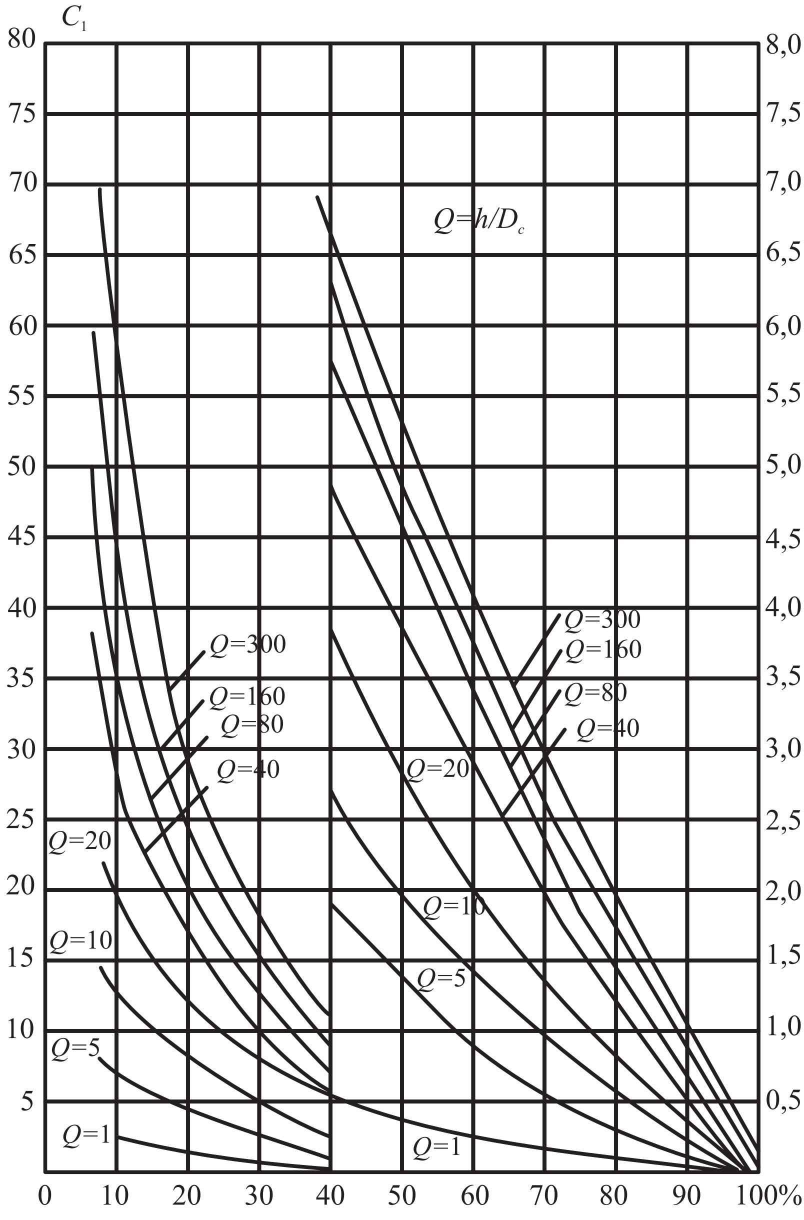
bu ýerde Γ – Eýleriň ikinji derejeli integraly ýa-da gamma funksiýa, şular üçin matematiki sprawoçniklerde (habar kitapçasynda) tablisalar bar we suratda grafigi görkezilen.

Galyňlygy gutarnyksyz bolan gatlakdaky guýular üçin debiti N. K. Girinskiniň formulasynyň kömegi bilen tapmak bolar:

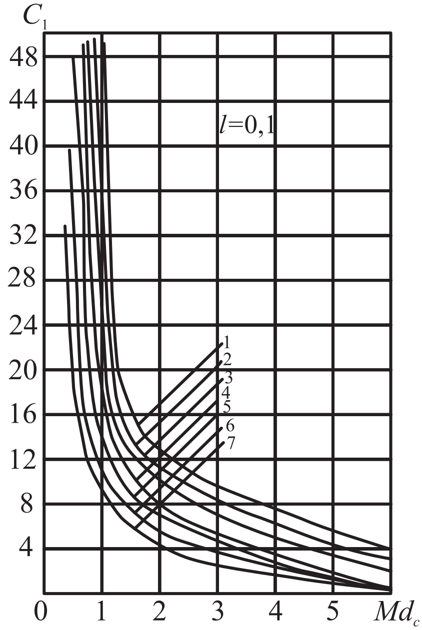
$$Q = \frac{2\pi kb}{\mu}\frac{P_k - P_c}{\ln\frac{1,6b}{r_c}}. \qquad \text{(VII.4)}$$



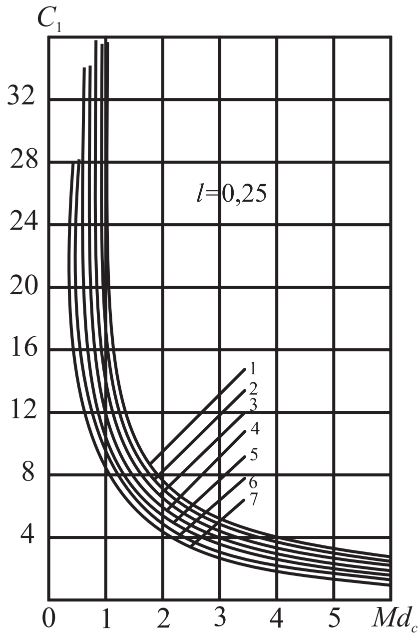
1-nji surat


C_1
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
8,0
7,5
7,0
6,5
6,0
5,5
5,0
4,5
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
$Q=h/D_c$
Q=300
Q=160
Q=80
Q=40
Q=20
Q=10
Q=5
Q=1
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100%

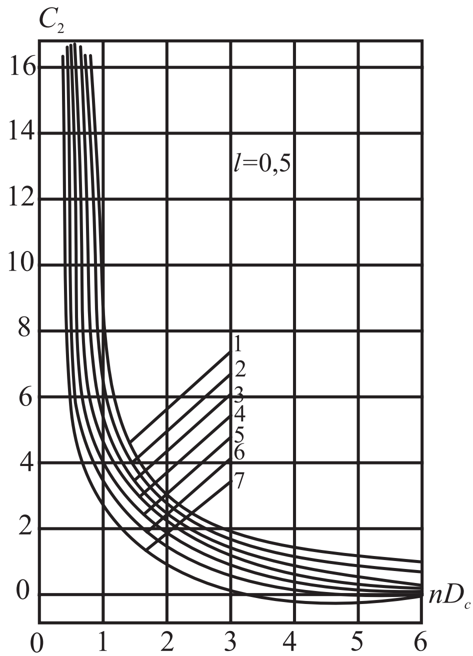
2-nji surat



3-nji surat



4-nji surat



5-nji surat

Açylyş derejesi we häsiýeti boýunça gidrodinamiki kämilleşmedik guýynyň debitini hem hasaplap bolýar:

$$Q = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{\mu\left[\ln\frac{R_k}{r_c} + C_1 + C_2\right]}, \qquad \text{(VII.5)}$$

bu ýerde C_1 – gatlagyň açyş derejesi boýunça kämilleşmedik guýuda goşmaça filtrasion garşylygyny takyklaýan ölçegsiz ululyk, C_2 – gatlagyň açyş häsiýeti boýunça kämilleşmedik guýuda goşmaça filtrasion garşylygy görkezýän ölçegsiz ululyk.

Iki görnüşli kämilleşmedik guýynyň suwuklygyň ýygnanmagyny W.I. Şurow elektrolitik modellerde öwrenip C_1 we C_2 koeffisiýentleri tapmak üçin aşakdaky grafikleri gurýar (*1-5-nji sur. ser.*). Bu ýerde C_1 – ululyk suratda $a = h/D_s$ we $h = b/h$ parametrlere baglylykda görkezilen; C_2 – ululyk, üç parametre baglylygy nD_s; $e = e'/D_c$ we $\alpha = d_O/D$ – suratda görkezilen; n – bir pogon metrdäki perfarasion deşijikleriň sanyny görkezýär; D_s – guýynyň diametri (m); e – okuň jynsa giriş çuňlugy; d_O – perfarasion deşijekleriň diametri.

Şu aşakdaky tablisadan $\alpha = d_O/D_s$ parametrleriň bahalarynyň we egrileriň arasyndaky degişlilik görünýär.

Guýynyň getirme radiusyny formula girizip başgaça ýazmak mümkin:

$$r_{c1} = r_c e^{-(c1 + c2)} = r_c e^{-c}.$$

№	1	2	3	4	5	6	7
α	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09

Şunuň ýaly kämilleşen guýynyň debiti, kämilleşmedik guýynyň debitine deň

$$Q = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{\mu \ln \dfrac{R_k}{r'_c}}, \tag{VII.6}$$

käbir ýagdaýda guýynyň kämilleşme koeffisiýentiniň kömegi bilen guýynyň gidrodinamiki kämilleşmezligi göz öňünde tutulýar:

$$\delta = \frac{Q}{Q_{sow}}, \tag{VII.7}$$

bu ýerde Q – kämilleşmedik guýynyň debiti, Q_{sow} – şol şertlerde kämilleşen guýynyň debiti.

Guýynyň kämilleşme koeffisiýenti δ we $C = C_1 + C_2$ ululyklar öz arasynda şu aňlatma bilen baglydyr:

$$\delta = \frac{\ln \dfrac{R_k}{r_c}}{\ln \dfrac{R_k}{r_c} + C} \tag{VII.8}$$

hem-de

$$C = \left[\frac{1}{\delta} - 1\right] \ln \frac{R_k}{r_c}.$$

Kitaplarda C ululyga baha bermek üçin δ-nyň grafigi getirilen.

VIII. SUWUKLYGYŇ ÖÝJÜKLI SREDADA KADALAŞAN BATSYZ HEREKETI

Eger-de pýezometrik üst bilen suwuklygyň erkin üsti gabat gelse we her bir nokatda hemişelik basyş täsir etse, suwuklygyň hereketi batsyz bolýar.

Batsyz hereketde suwuklygyň erkin *AB* üsti, guýudaky ýa-da gönüburçly galereýadaky, suwuklygynyň derejesinden ýokarda ýerleşen.

Nebit çykaryşda batsyz filtrasiýa duş gelinýär, meselem, haçanda gatlagyň energiýasynyň güýçden gaçmagynyň yzy süre nebit onuň üstünden (krowlýa) aşaga düşýär.

Batsyz süzüjilik, nebit ýataklaryny şahtaly we karýerli peýdalanyş usulynda öz ornuny tutýar. Gidrotehnikler toprakdaky akymyň batsyz hereketi bilen, köplenç, duş gelmeli bolýarlar. Gatlakdaky suwuklygyň kadalaşan batsyz hereketine degişli mysal işlenende, köplenç, Dýupýui-Forhgeýmeriň gidrawliki teoriýasy diýip atlandyrylan-ýakynlaşdyrylan teoriýa ulanylýar. Gidrawliki teoriýada şu aşakdaky çaklamalar edilen.

1) filtrasiýanyň tizliginiň gorizontal komponentleri akymyň kese kesiginde deň ölçegli bölünen.

2) basyş wertikal boýunça gidrostatik kanuna laýyklykda bölünen $H + \dfrac{P}{\gamma} = const$ – wertikal boýunça hemişelik hasaplanýar.

Gidrawlik teoriýanyň bu çaklamalary erkin üstüň gyşarmasy $i = \sin\alpha \approx 1$ bolanda akymyň şol böleginde goýberilen (α – üstüň gorizontala garşy gyşarma burçy).

Eger-de erkin üstli suwuklygyň akymy uly meýdany tutsa, onda erkin üstüň çala (sähelçe) gyşarmasy bolýar. Şu ýagdaýda gönüçyzykly ýerasty gönüburçly galereýa we gidrodinamiki kämilleşen guýy batsyz akymyň meselelerini birölçegli hereketiň teoriýasy boýunça çözüp bolýar.

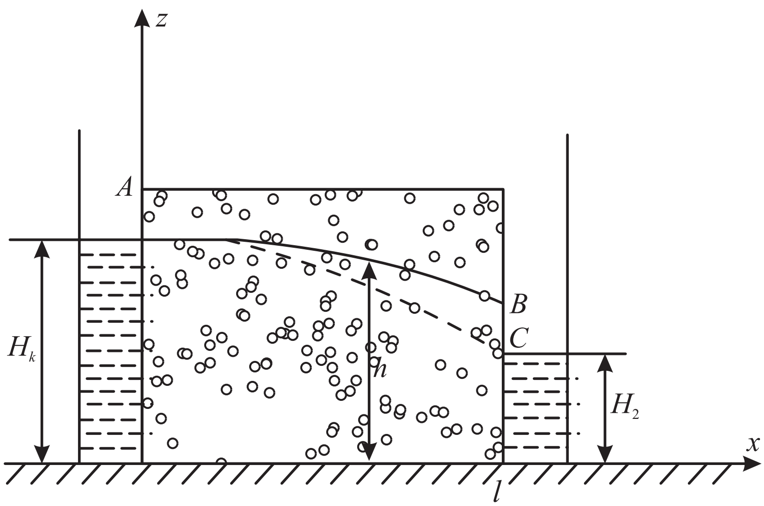
8.1. Suwuklygyň gönüçyzykly ýerasty gönüburçly galereýa batsyz hereketi

Gatlakda suwuklygyň kadalaşan batsyz hereketi Darsiniň kanuny boýunça bolup geçýär diýip hasaplasak, koordinata oklarynyň ýerleşişini saýlanyp alnan ýagdaýynda, «*B*» inli ýerasty gönüburçly galereýa ýygnanmagyny iýmitlendiriş oblast tarapyndan debit bilen häsiýetlendirilýär (*1-2-3-nji suratlar*):

$$Q = \frac{Bk\gamma_{\gamma}(H_k^2 - H_g^2)}{2\mu_L}. \qquad \text{(VIII.1)}$$

Pýezometrik çyzyk (*AC* depressiýanyň egri çyzygy) aşakdaky deňlemä laýyk ýazylýar:

$$h = \sqrt{H_k^2 - \frac{H_k^2 - H_k^2}{L}x}. \qquad \text{(VIII.2)}$$



1-nji surat

Suwuklygyň bölejikleriniň hereketi bolsa – şu aşakdaky kanuna boýun egýär:

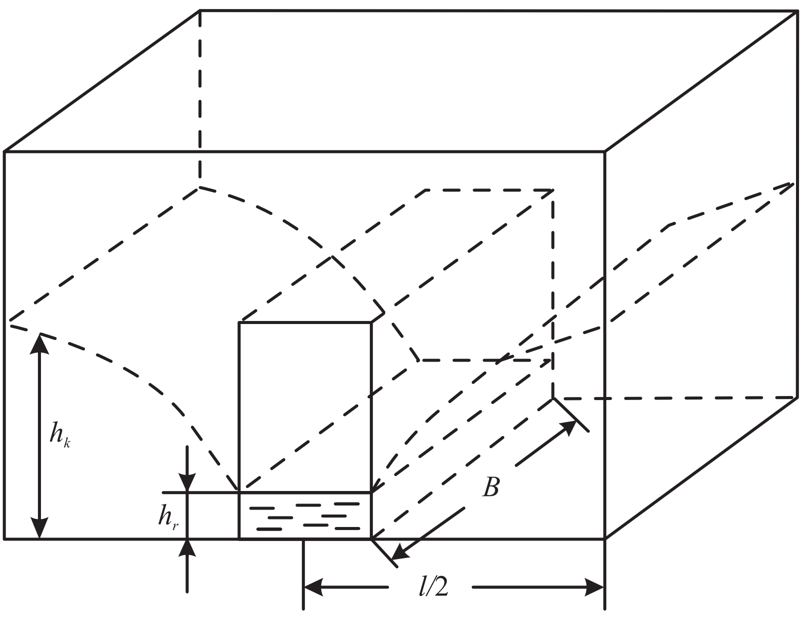
$$t = \frac{B^2 mk\gamma}{3Q^2\mu}\left[\left[H_k^2 - \frac{2Q\mu}{Bk\gamma}x_0\right]^{3/2} - \left[H_k^2 - \frac{2Q\mu}{Bk\gamma}x\right]\right]^{3/2}, \quad \text{(VIII.3)}$$

bu ýerde x_0 – suwuklygyň hereket edýän bölejikleriniň koordinatasy ($t = 0$) bolanda. Suwuklygyň hereketi hemme gatlaklarda Darsiniň çyzyklaýyn kanunyna laýýk bolmadyk ýagdaýynda

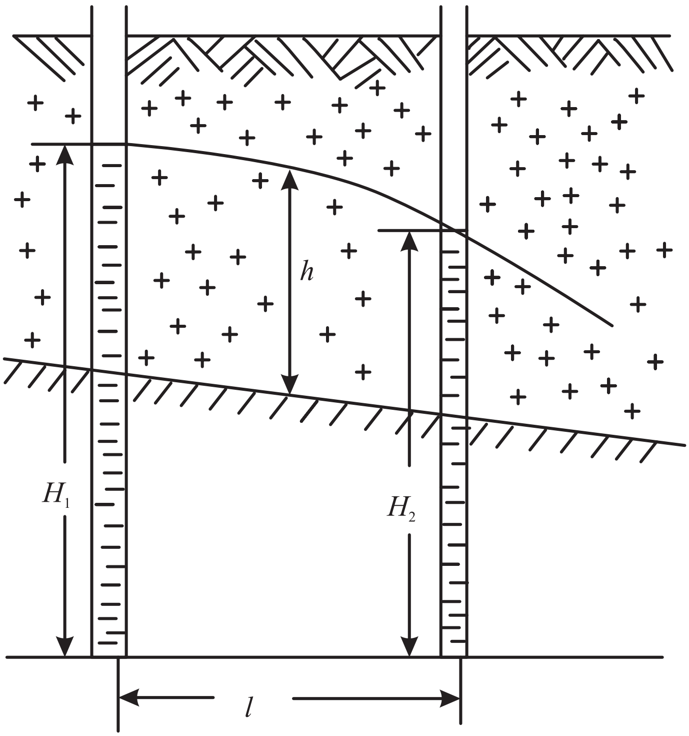
$$\omega = C\left[-\frac{dh}{dx}\right]^{1/n}, \quad \text{(VIII.4)}$$

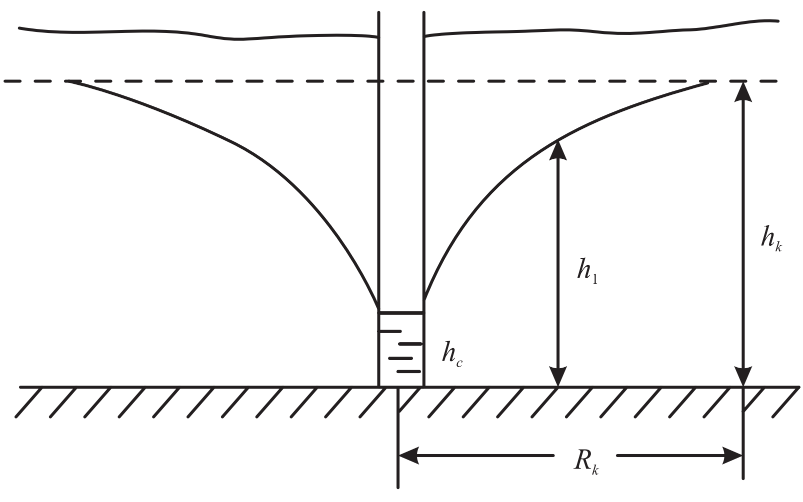
bu ýerde C we n käbir hemişelikler, eger $1 < n < 2$ onda debitiň formulasy aşakdaky ýaly bolýar.

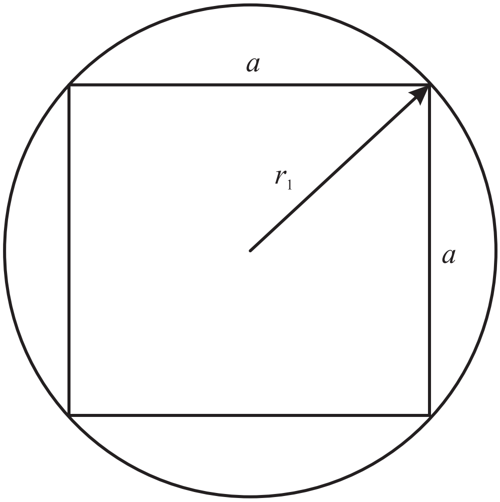
$$Q = BC\left[\frac{H_k^{n+1} - H_g^{n+1}}{(n+1)l}\right]^{1/n}. \quad \text{(VIII.5)}$$



2-nji surat


h
H1
H2
l


hk
h1
hc
Rk



3-nji surat

8.2. Suwuklygyň guýynyň düýbüne batsyz hereketi

Eger-de R_k radiusly gidrodinamiki kämilleşen guýy ýokardaky birinji suwly gatlagy açsa we gatlakda Darsiniň kanuny boýunça, erkin üstli suwuklygyň hereketi öz ýerini tutýan bolsa, onda debit şu formula boýunça hasaplanýar.

$$Q = \frac{\Pi kj(H_k^2 - H_c^2)}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}} \qquad \text{(VIII.6)}$$

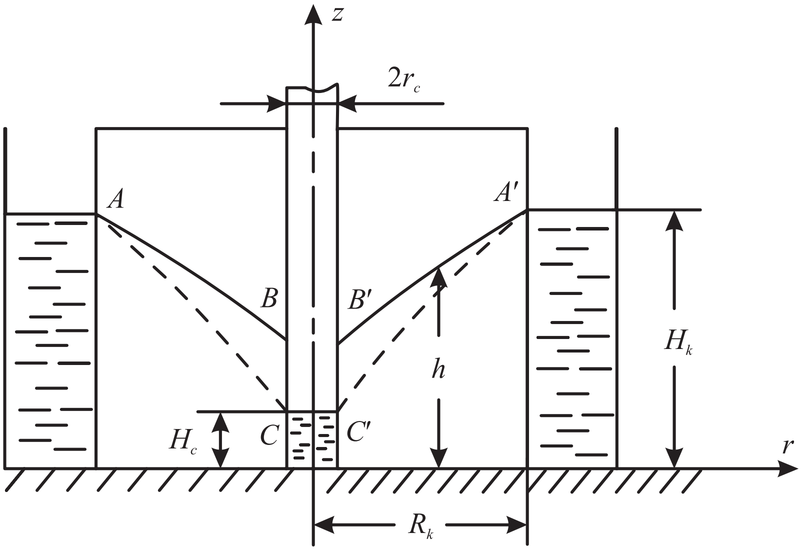
aşakdaky formula boýunça bolsa, depressiýanyň egri çyzygy hasaplanýar (*4-nji surat*).

$$h = \sqrt{H_k^2 - \frac{H_k^2 - H_k^2}{\ln \frac{R_k}{r_c}} \ln \frac{R_k}{r}}. \qquad \text{(VIII.7)}$$

Bölejikleriniň hereketiniň wagty bolsa grafik – analitik usuly esasynda aşakdaky deňlemäni integrirlemek bilen tapylýar.

$$t = \frac{2\pi m}{Q} \int_r^{r_0} r \sqrt{H_k^2 - \frac{Q\mu}{\Pi kj} \ln \frac{R_k}{r} dr} \qquad \text{(VIII.8)}$$

ýa-da ýakynlaşan formula bilen tapyp bolýar.



4-nji surat

$$t = \frac{2\pi m}{Q}\tilde{h}\int_{r}^{r_0} rdr = \frac{\pi\tilde{h}m}{Q}(r_0^2 - r^2), \qquad \text{(VIII.9)}$$

bu ýerde $\overline{h}$ ululygyň r-den r_0-la çenli üýtgeýän aralykdaky badyň ortaça bahasy.

Suwuklygyň hereketi Darsiniň kanunyna laýyk gelmedik ýagdaýynda guýynyň debitini aşakdaky formula bilen tapyp bolýar.

$$Q = 2\pi c\left(\frac{n-1}{n+1}\frac{H_k^{n+1} - H_c^{n+1}}{\frac{1}{r_c^{n-1}} - \frac{1}{R_k^{n-1}}}\right)^{\frac{1}{n}}.$$

$n = 2$ bolanda formuladan A. A. Krasnopolskiý tarapyndan jaýrykly jynslarda batsyz süzüjilik ýagdaýy üçin formula alynýar. Dýupýuiniň formulasy (VIII.6) diýip atlandyrylan, debitiň formulasy örän takyk bolýandygyny M. A. Çarnyý görkezdi.

IX. ENDIGAN DÄL GATLAKDAKY FILTRASION AKYMLAR

Tebigatda endigan nebitgaz önümli gatlaklar örän az duş gelýär. Şolar ýaly gatlaklarda filtrasiýany häsiýetlendirýän (gatlagyň geçirijilik ukyby, öýjükligi) gatlagyň meýdany, galyňlygy boýunça dürli bolup üýtgeýär. Köp ýagdaýda gatlagyň geçirijiligi we öýjükligi hiç bir kada gabat gelmeýär. Şol sebäpli olar ýaly ýagdaýda gatlagy ortaça endigan diýip hem hasap edilýär.

Makro endigan däl gatlaklar hem az bolmadyk ýagdaýda duş gelýär. Olarda gatlagyň galyňlygy we meýdançasy boýunça geçirijilik we öýjüklik biri-birinden örän tapawutlanýar.

Makro endigan däl nebit we gaz kollektorlar aşakdaky görnüşinde duş gelýär.

1. Gatlak birnäçe dürli geçirijilikli we öýjüklikli gatlardan durýar.

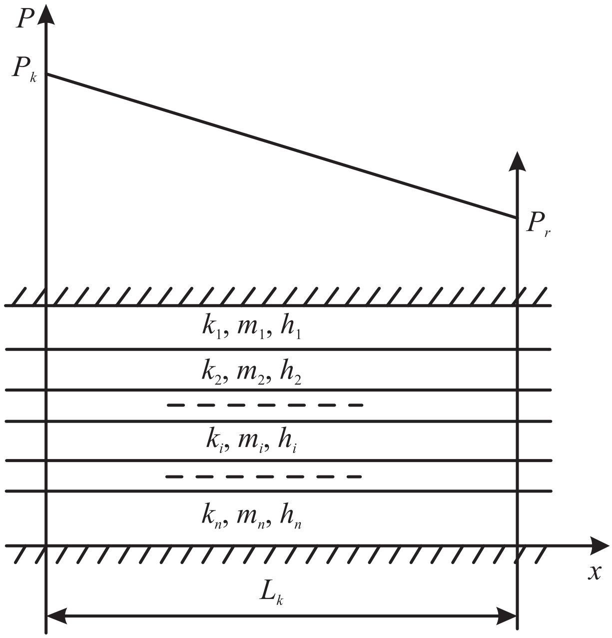
2. Gatlagyň meýdany boýunça zolaklaýyn endigan bolmadyk. Zolakdan zolaga geçende geçirijilik we öýjüklik bökdürilip üýtgeýär.

3. Endigan däl gatlakda geçirijilik we öýjüklik bellibir üznüksiz funksiýasy $K\ (x, y, z)$ bolup durýar.

Endigan däl gatlaklardaky gönüçyzyklaýyn-parallel akym.

9.1. Gatlagyň galyňlygy boýunça endigan bolmadyk

Galyňlygy h we ini B bolan gorizontal gatlak birnäçe $h_1, h_2, h_3, \ldots, h_n$ galyňlykly, $K_1, K_2, K_3, \ldots, K_n$ geçirijilikli we $m_1, m_2, m_3, \ldots, m_n$ öýjükli gatjagazlardan durýar. $P_k = const$ we $P_g = const$ saklanýanlygy sebäpli gatjagazlarda durnuklaşan gönüçyzyklaýyn – parallel akym öz ornuny tutýar (*1-nji surat*).



1-nji surat

Her bir gatlajykda basyşyň ýaýraýşy gönüçyzyklaýyn bolar:

$$P = P_k - \frac{P_k - P_g}{L_k} \cdot X.$$

Gatjagazlardaky gradiýentiň bahalary hem deň bolar:

$$\frac{dP}{dX} = -\frac{P_k - P_g}{L_k} \cdot X.$$

i bellikli gatjagazda filtrasion tizlik bolar:

$$\vartheta_i = \frac{K_i}{\mu_i} \frac{P_k - P_g}{L_k}, \quad i = 1, 2, \ldots, n.$$

Gatjagazlaryň debitini Q_i jemläp, akymyň doly debitini tapýarys:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{K_i}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_g}{L_k} \cdot Bh_i = \frac{B(P_k - P_g)}{\mu \cdot L_k} \sum_{i=1}^{n} K_i h_i.$$

Her gatjagazdaky suwuklygyň hereketiniň kanuny aşakdaky formula laýyklykda kesgitlenýär:

$$t_i = \frac{m_i}{\vartheta_i}X = \frac{m_i b h_i}{Q_i}X = \frac{m_i \mu L_k}{K_i(P_k - P_g)}X, \quad i = 1, 2, \ldots, \quad n.$$

Gidrodinamiki hasap işlerinde köp halatda önümli gatlaga endigan diýip hasap etmek bolar, eger-de formulalarda ortaça geçirijiligi K_{ort} ulansak, şonda gatlakdaky iki akymyň debiti deň bolar.

$$Q = \frac{B(P_k - P_g)}{\mu \cdot L_k}\sum_{i=1}^{n} K_i h_i = \frac{K_{ort}}{\mu}\frac{P_k - P_g}{L_k}Bh,$$

bu ýerden

$$K_{ort} = \sum_{i=1}^{n}\frac{K_i h_i}{h}.$$

9.2. Zolak görnüşinde endigan däl gatlakdaky akym

Galyňlygy h we ini B kese gatlakda birnäçe uzynlygy l_1, l_2, l_3, …, l_n bolan we dürli geçirijilikli hem-de öýjükli zolaklar bar. Gatlak çäginde hemişelik üýtgemeýän P_k we P_g basyşlar saklanýar. Filtrasion akym her zolagyň çägine perpendikulýar. Gatlakda gönüçyzyklaýyn parallel akym öz ornuny tutýar (*2-nji surat*).

Her zolakda basyşyň ýaýraýşy gönüçyzyklaýyn bolar

$$P_i(X) = P_{i-1} - \frac{P_{i-1} - P_i}{l_i}X \qquad 0 \le X \le l_i,$$

bu ýerde P_{i-1}, P_i – zolagyň başyndaky we soňundaky basyş.

Her zolagyň çäginde basyşyň gradiýenti bolar:

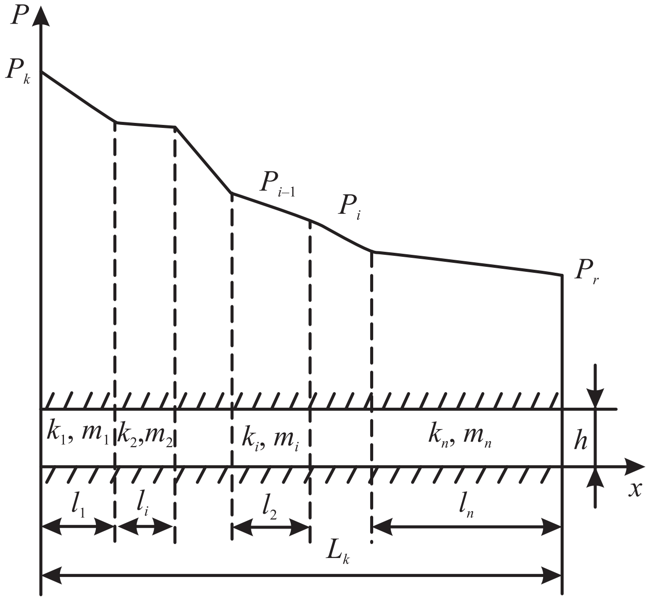
$$\frac{dP_i}{dX} = -\frac{(P_{i-1} - P_i)}{l_i}.$$

Üznüksiz akymyň deňlemesine laýyklykda akymyň her kese kesik meýdanynda onuň debiti hemişelik bolar:

$$Q = \frac{K_1}{\mu}\frac{P_k - P_1}{l_1}Bh = \ldots = \frac{K_1}{\mu}\frac{P_{n-1} - P_s}{l_n}Bh$$

we

$$Q = \frac{Bh}{\mu}\frac{P_{i-1} - P_i}{\frac{l_i}{K_i}} = \frac{Bh\sum_{i=1}^{n}(P_{i-1} - P_i)}{\mu\sum_{i=1}^{n}\frac{l_i}{K_i}} = \frac{Bh}{\mu}\frac{P_k - P_g}{\sum_{i=1}^{n}\frac{l_i}{K_i}}.$$



2-nji surat

Akymyň filtrasion tizligi her kese kesik meýdanynda hemişelik bolar

$$\omega = \frac{Q}{\omega} = \frac{Bh}{\mu}\frac{P_k - P_g}{\sum_{i=1}^{n}\frac{l_i}{K_i}} \Big/ (Bh) = \frac{P_k - P_g}{\mu\sum_{i=1}^{n}\frac{l_i}{K_i}}.$$

Endigan däl gatlagyň geçirijilik ukybynyň ortaça bahasy bolar:

$$Q = \frac{Bh}{\mu}\frac{P_k - P_s}{\sum_{i=1}^{n}\frac{l_i}{K_i}} = \frac{K_{ort}}{\mu}\frac{P_k - P_g}{L_k}Bh,$$

$$K_{ort} = \frac{L_k}{\sum_{i=1}^{n}\frac{l_i}{K_i}}.$$

Endigan däl zolaklaryň çaknyşýan ýerinde basyş P_i bolar:

$$\vartheta = \frac{K_i}{\mu}\frac{P_k - P_1}{l_i} = \frac{K_2}{\mu}\frac{P_1 - P_g}{l_2},$$

bu ýerden

$$P_1 = \frac{P_k \dfrac{l_2}{K_2} + P_s \dfrac{l_1}{K_1}}{\dfrac{l_1}{K_1} + \dfrac{l_2}{K_2}}.$$

Onda gatlakdaky basyşyň ýaýraýşy:

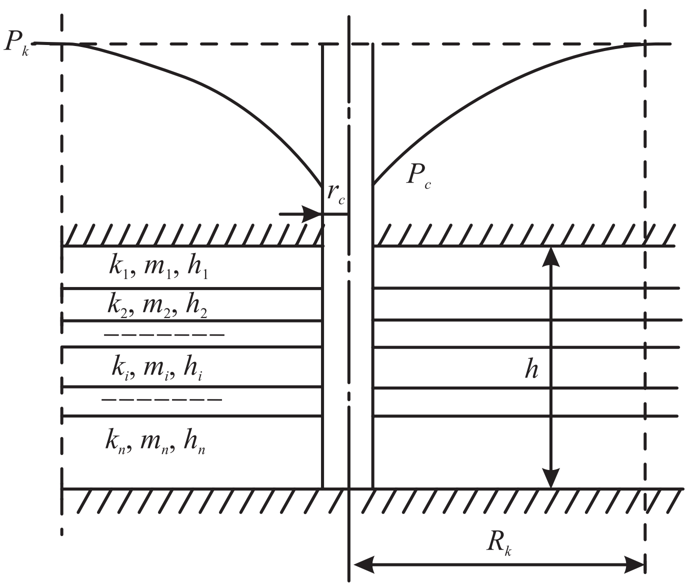
$$P_1(X) = P_k - \frac{(P_k - P_g)\cdot K_2}{l_1 K_2 + l_2 K_1}\cdot X \qquad 0 \le X \le 1,$$

$$P_2(X) = P_s + \frac{(P_k - P_g)\cdot K_1}{l_1 K_2 + l_2 K_1}\cdot (L_k - X) \qquad l_1 \le X \le L_k.$$

9.3. Tekiz-radial akym. Endigan däl gatlak

Gatlak birnäçe geçirijilikli we öýjükli gatlajyklardan durýar. Konturda we guýynyň düýbünde basyşlar hemişelik saklanýar (*3-nji surat*).

$$P_k = const, P_s = const.$$



3-nji surat

Her üýtgemeýän galyňlykly h_i we geçirijilikli K_i gatlajyklarda tekiz-radial akym öz ornuny tutýar we olaryň her birinde basyşyň paýlanyşy aşakdaky deňlemä laýyk bolar:

$$P = P_k - \frac{P_k - P_s}{\ln \frac{R_k}{r_s}} \ln \frac{R_k}{r}.$$

Gatlajyklardaky basyşyň gradiýenti hem deň bolar:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{P_k - P_s}{\ln \frac{R_k}{r_s}} \frac{1}{r}.$$

Filtrasion tizlik, geçirijilik ukybyna göni proporsional bolup, her gatyň tizliginiň öz bahasy bolar

$$\vartheta_i = \frac{K_i}{\mu} \frac{P_k - P_s}{\ln \frac{R_k}{r_s}} \frac{1}{r}, \quad i = 1, 2, 3, \ldots, \quad n.$$

Gatlajyklaryň debitiniň jemi, doly gatlakdaky akymyň debitini berer

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{2\pi K_i h_i}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_s}{\ln \frac{R_k}{r_s}} \cdot t = \frac{2\pi}{\mu} \frac{P_k - P_s}{\ln \frac{R_k}{r_s}} \sum_{i=1}^{n} K_i h_i.$$

Gatlagyň ortaça geçirijiligi bolsa deň bolar:

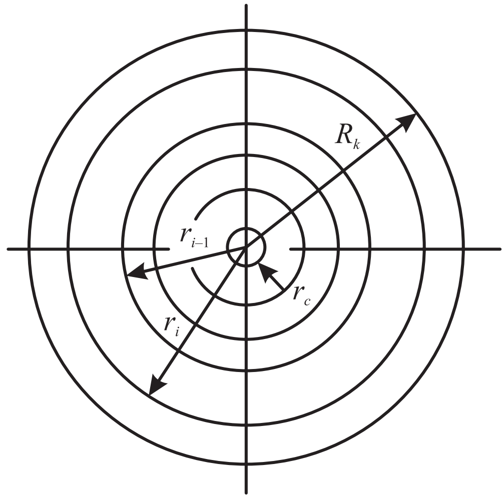
$$Q = \frac{2\pi}{\mu} \frac{P_k - P_s}{\ln \frac{R_k}{r_s}} \sum_{i=1}^{n} K_i h_i = \frac{2\pi K_{ort} h}{\mu} \frac{P_k - P_s}{\ln \frac{R_k}{r_s}},$$

bu ýerden

$$K_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i h_i}{h}.$$

9.4. Zolak görnüşli endigan däl gatlakdaky tekiz-radial akym

Galyňlygy *h* kese gatlakda dürli öýjükli we geçirijilikli *n* halka görnüşli zolaklar bar diýip hasap edýäris. Her zolagyň daşky çäginde $P_s = const$ we içki r_s çäginde $P_s = const$. Gatlakda tekiz-radial akym Darsiniň kanunyna boýun egýär (*4-nji surat*).



4-nji surat

Onda her zolakda basyşyň ýaýraýşy logarifmiki kanuna boýun egýär:

$$P_i(r) = P_i - \frac{P_i - P_{i-1}}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \ln \frac{r_i}{r}, \quad r_{i-1} \le r \le r_i,$$

bu ýerde $P_i(r)$ – zolagyň islendik nokadyndaky basyş, r_i we r_{i-1} – zolagyň daşky we içki radiuslary ($r_g = r_s$; $r_n = R_k$), P_i, P_{i-1} – zolagyň daşky we içki çägindäki basyşlar.

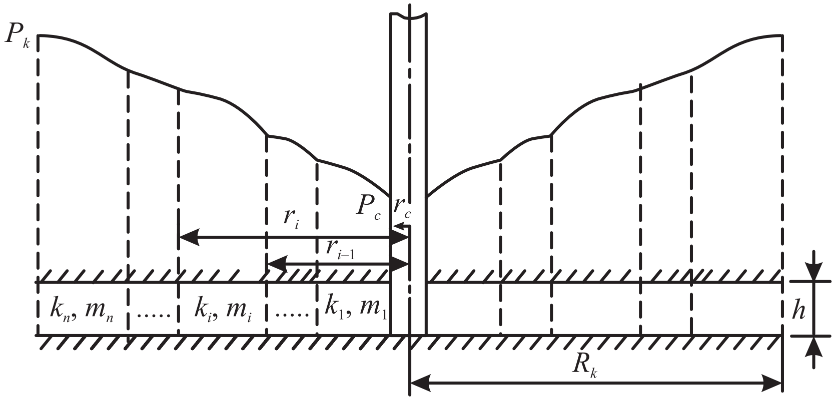
Basyş gradiýenti her zolakda giperbola kanunyna laýyklykda üýtgeýär:

$$\frac{dP_i}{dr} = \frac{P_i - P_{i-1}}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \frac{1}{r}, \quad r_{i-1} \le r \le r_i, \quad i = 1, 2, 3, \ldots, \quad n.$$

Zolak görnüşli endigan däl gatlakda tekiz-radial akymda basyşyň ýaýraýşy suratda görkezilen (*5-nji surat*).

Akymyň debiti her halka görnüşindäki zolagyň gapdal meýdanyndan geçýän debite deň bolar:

$$Q = \frac{2\pi K_1 h}{\mu} \frac{P_{1-2} - P_s}{\ln \frac{r_{1-2}}{r_s}} = \frac{2\pi K_n h}{\mu} \frac{P_k - P_{n-1}}{\ln \frac{R_k}{r_{n-1}}},$$



5-nji surat

onda

$$Q = \frac{2\pi h}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_s}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{K_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}.$$

Akymyň her bir nokadyndaky filtrasion tizlik

$$\vartheta = \frac{Q}{F(r)} = \frac{Q}{2\pi r h} = \frac{P_k - P_s}{\mu \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{K_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \cdot \frac{1}{r}.$$

Zolak görnüşli endigan däl gatlagyň geçirijilik ukybynyň ortaça bahasy

$$K_{ort} = \frac{\ln \frac{R_k}{r_s}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{K_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}.$$

X. GYSYLÝAN SUWUKLYGYŇ WE GAZYŇ KADALAŞAN FILTRASIÝASY

10.1. Darsiniň kanunyna laýyklykda maýyşgak (gysylýan) suwuklygyň we gazyň kadalaşan filtrasiýasynyň differensial deňlemeleri

Bir fazalaýyn gysylýan flýuidiň filtrasiýasynyň differensial deňlemelerini inersion we agram güýçlere biperwaý garap ýazalyň.

Onda üznüksiz filtrasion akymyň deňlemesi şu görnüşde bolar:

$$\frac{\partial(pw_x)}{\partial x}+\frac{\partial(pw_y)}{\partial y}+\frac{\partial(pw_z)}{\partial z}=-\frac{\partial(dm)}{\partial t}. \qquad \text{(X.1)}$$

Şeýle-de, filtrasion hereketiň deňlemesi şeýle ýazylýar:

$$w_x=-\frac{K}{\mu}\frac{\partial P}{\partial x}; \quad w_y=-\frac{K}{\mu}\frac{\partial P}{\partial y}; \quad w_z=-\frac{K}{\mu}\frac{\partial P}{\partial z}. \qquad \text{(X.2)}$$

L. S. Leýbenzonyň funksiýasyny girizeliň we onuň differensialy

$$dL=\frac{K(P)\rho(P)}{\mu(P)}dP, \qquad \text{(X.3)}$$

onda

$$L=\int\frac{K(P)\rho(P)}{\mu(P)}dP+C. \qquad \text{(X.4)}$$

Leýbenzonyň funksiýasy L gatlakdaky basyş P wagta we koordinata bagly bolany sebäpli, ýokardaky deňlemäni (X.3) birnäçe üýtgeýjilere bagly doly differensial görnüşinde ýazyp bolar

$$\begin{aligned}&\frac{\partial L}{\partial x}dx+\frac{\partial L}{\partial y}dy+\frac{\partial L}{\partial z}dz+\frac{\partial L}{\partial t}dt=\\&=\frac{K(P)\rho(P)}{\mu(P)}x\frac{\partial L}{\partial x}dx+\frac{\partial L}{\partial y}dy+\frac{\partial L}{\partial z}dz+\frac{\partial L}{\partial t}dt.\end{aligned} \qquad \text{(X.5)}$$

Koeffisiýentleri deňeşdirmäniň netijesinde ýazmak bolar:

$$\frac{\partial L}{\partial x}=\frac{K(P)\rho(P)}{\mu(P)}\frac{\partial P}{\partial x};\quad \frac{\partial L}{\partial y}=\frac{K(P)\rho(P)}{\mu(P)}\frac{\partial P}{\partial y};$$

$$\frac{\partial L}{\partial z}=\frac{K(P)\rho(P)}{\mu(P)}\frac{\partial P}{\partial z};\quad \frac{\partial L}{\partial t}=\frac{K(P)\rho(P)}{\mu(P)}\frac{\partial P}{\partial t}. \qquad (X.6)$$

Deňleme (X.2) flýuidiň dykyzlygyna $\rho(P)$ köpeldip, massalaýyn filtrasion tizligi ýazyp bileris:

$$\rho w_x=-\rho\frac{K}{\mu}\frac{\partial P}{\partial x}=-\frac{\partial L}{\partial x};\quad \rho w_y=-\rho\frac{K}{\mu}\frac{\partial P}{\partial y}=-\frac{\partial L}{\partial y};$$

$$\rho w_z=-\rho\frac{K}{\mu}\frac{\partial P}{\partial z}=-\frac{\partial L}{\partial z}. \qquad (X.7)$$

Onda deňlemä (X.1) bahalaryny goýup taparys:

$$\frac{\partial^2 L}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 L}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 L}{\partial z^2}=\frac{\partial(\rho m)}{\partial t} \qquad (X.8)$$

ýa-da

$$\nabla^2 L=\frac{\partial(\rho m)}{\partial t}. \qquad (X.9)$$

Soňky (X.8) we (X.9) deňlemeler bir jynsly öýjükli sredada flýuidiň Darsiniň kanunyna laýyklykda kadalaşmadyk hereketini häsiýetlendirýär.

Filtrasiýa kadalaşan ýagdaýynda $\partial(\rho m)/dt = 0$ we deňleme (X.8) aşakdaky görnüşe eýe bolýar:

$$\frac{\partial^2 L}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 L}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 L}{\partial z^2}=0 \qquad (X.10)$$

ýa-da

$$\nabla^2 L=0. \qquad (X.11)$$

Şeýlelikde, formula (X.4) bilen kesgitlenýän Leýbenzonyň funksiýasy Laplasyň deňlemesi bilen kanagatlaşýar.

10.2. Gysylmaýan suwuklygyň, gysylýan flýuidleriň kadalaşan filtrasiýasy bilen anologiýasy (meňzeşligi)

Gysylýan suwuklygyň we gazyň kadalaşan filtrasiýasy bolanda massalaýyn ýa-da agramlaýyn harçlanyşy gatlagyň hemme kese kesiginde birmeňzeş bolýar.

Gowrümleýin harçlanyş bolsa, suwuklygyň ýa-da gazyň giňelmeginiň hasabyna basyşyň aşak gaçmagy bilen ösýär.

Şu funksiýany

$$L = \int jdP + C. \tag{X.12}$$

L. S. Leýbenzonyň funksiýasy diýip atlandyrýarys.

Şu funksiýanyň girizilmeginiň maksadyny aýdyňlaşdyrýan formulalary deňeşdirmegimizden görünýär. Ol gysylmaýan suwuklyklar üçin Darsiniň kanuny differensial görnüşde

$$Q = -\frac{k}{\mu}\frac{dP}{dS} \cdot F(S), \tag{X.13}$$

bu ýerde Q – suwuklygyň hemişelik göwrümleýin harçlanyşy we gysylýan suwuklyk hem-de gaz üçin:

$$G = -\frac{k}{\mu}\frac{jdP}{dS} \cdot F(S) = \frac{k}{\mu}\frac{dL}{dS} \cdot F(S), \tag{X.14}$$

bu ýerde G – agramlaýyn harçlanyş, $dL = jdP$ – Leýbenzonyň funksiýasynyň differensialy. Aňlatmalar birmeňzeş görnüşde differensial deňleme bolup, deňlemede – göwrümleýin harçlanyş bilen – (X.14) formuladaky agramlaýyn harçlanyş, hem-de (X.13) formuladaky basyş – (14) formuladaky Leýbenzonyň funksiýasy bilen gabat gelende, Darsiniň kanuny boýunça gysylmaýan suwuklygyň kadalaşan filtrasiýasy üçin alnan hemme formulalary, gysylýan suwuklygyň we gazyň kadalaşan filtrasiýasy üçin şol bir çäklendirilen şertlerde şu aşakdaky üýtgeýjileriň çalyşmasy bilen ulanmak mümkin.

Gysylmaýan suwuklyk	Gysylýan suwuklyk ýa-da gaz
1. Göwrümleýin harçlanyş	1. Agramlaýyn harçlanyş
2. Basyş	2. Leýbenzonyň funksiýasy
3. Göwrümleýin filtrasiýa tizligi	3. Agramlaýyn filtrasiýa tizligi

Gukuň kanunyna laýyk gelýän gysylma damjalaýyn suwuklyk üçin udel agramyň, basyşa baglylyk deňlemesi aşakdaky görnüşde bolar:

$$L = j_0 \ell^{\beta s(P-P_0)} = j_0 \ell_s^{P-P_0/K}, \tag{X.15}$$

bu ýerde β_S – suwuklygyň göwrümleýin gysyş koeffisiýenti, K_S – suwuklygyň maýyşgaklyk moduly.

Gysylýan suwuklyk üçin Leýbenzonyň funksiýasynyň dogry bahasy aşakdaka deňdir.

$$L = \int jdP + C = \int j_{0\ell}^{\beta s(P-P_0)} dP + C = j/\beta s + C \tag{X.16}$$

Leýbenzonyň funksiýasynyň ýakynlaşan bahasy bolsa:

$$L = \int \gamma_0 [1 + \beta s \cdot (P - P_0)] dP + C. \tag{X.17}$$

Köplenç, $\beta_S(P - P_O) << 1$ bolup, $P = j_0P + C$ diýip kabul etmek mümkin onda, gysylýan suwuklygyň filtrasiýasyny, gysylmaýan suwuklygyň formulalary bilen hasaplamak bolar.

Ideal gaz halynyň deňlemesini izotermik akymda aşäkdaky ýaly ýazmak mümkin:

$$\frac{P}{j} = \frac{P_{at}}{j_{at}} = RT, \tag{X.18}$$

bu ýerde j_{at} – atmosfera basyşda we gatlak temperaturada gazyň udel agramy.

Bu ýerde

$$j = \frac{j_{at}P}{P_{at}}. \tag{X.19}$$

Şol sebäpli Leýbenzonyn funksiýasy ideal gaz üçin şu görnüşe eýe bolýar:

$$L = \int jdP + C = \int \frac{j_{at}P}{P_{at}} dP + C = \frac{j_{at}P^2}{2P_{at}} + C, \tag{X.20}$$

bu ýerde P – absolýut basyş.

1) Darsiniň kanuny boýunça ideal gazyň parallel – akymly filtrasiýasyna seredeliň. Parallel akymly filtrasiýada gysylmaýan suwuklygyň göwrümleýin harçlanyşy (X.13) formula bilen kesgitlenýär; aýdylan gysylmaýan suwuklyk we gaz akymlarynyň arasyndaky meňzeşliklerden peýdalanyp, gaz üçin agramlaýyn harçlanyşyň formulasyny ýazyp bileris:

$$G = \frac{K(L_k - L_g)}{\mu_1} Bh, \tag{X.21}$$

ýa-da (X.20) hasaba alyp:

$$G = \frac{Kj_{at}(P_k^2 - P_g^2)}{2\mu P_{at} l} Bh, \tag{X.22}$$

bu ýerde Q_{at} – atmosfera basyşyna getirilen göwrümleýin harçlanyş diýsek, onda:

$$Q_{at} = \frac{G}{j_{at}}; \quad Q_{at} = \frac{K(P_k^2 - P_g^2)}{2\mu P_{at} l} Bh. \tag{X.23}$$

Gysylýan suwuklygyň parallel – akymly filtrasiýasy üçin, basyşyň gatlakda ýaýraýyş kanunyny aňladýan formulada P-ni L bilen çalşyp, Leýbenzonyň funksiýasynyň çyzykly kanunyna görä ýaýraýşyny alarys:

$$L = L_k - \frac{L_k - L_g}{l} x \tag{X.24}$$

we ýokarda berlen formulany ulanyp parabolik kanuny boýunça basyşyň ýaýraýşyny ýazyp bileris:

$$P^2 = P_k^2 - \frac{P_k^2 - P_g^2}{l} x. \tag{X.25}$$

Göwrümi boýunça orta bahaly gazyň gatlakda basyşy bolsa:

$$\tilde{P} = \frac{2}{3} \frac{P_k^3 - P_g^3}{P_k^2 - P_g^2}. \tag{X.26}$$

2) gazyň tekiz radial filtrasiýasy üçin (X.13) Dýupýuiniň formulasyna laýyklykda gazyň agramlaýyn debitiniň formulasyny ýazyp bileris:

$$G = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}}. \qquad (X.27)$$

Leýbenzonyň funksiýasynyň bahasyny ýokardaky formula goýsak, onda

$$G = \frac{\pi khj_{at}(P_k^2 - P_c^2)}{\mu P_{at} \ln \frac{R_k}{r_c}} \qquad (X.28)$$

we atmosfera basyşyna getirilen gaz guýynyň göwrümleýin debiti üçin aňlatmany şu görnüşde alarys:

$$Q_{at} = \frac{\pi kh(P_k^2 - P_c^2)}{\mu P_{at} \ln \frac{R_k}{r_c}} \qquad (X.29)$$

(X.16) formulada P-ni L-e çalşyp, gazyň tekiz radial süzüjiliginde P-niň logarifmiki ýaýraýyş kanunyny alarys:

$$L = L_k - \frac{(L_k - L_c)}{\ln \frac{R_k}{r_c}} \ln \frac{R}{r}. \qquad (X.30)$$

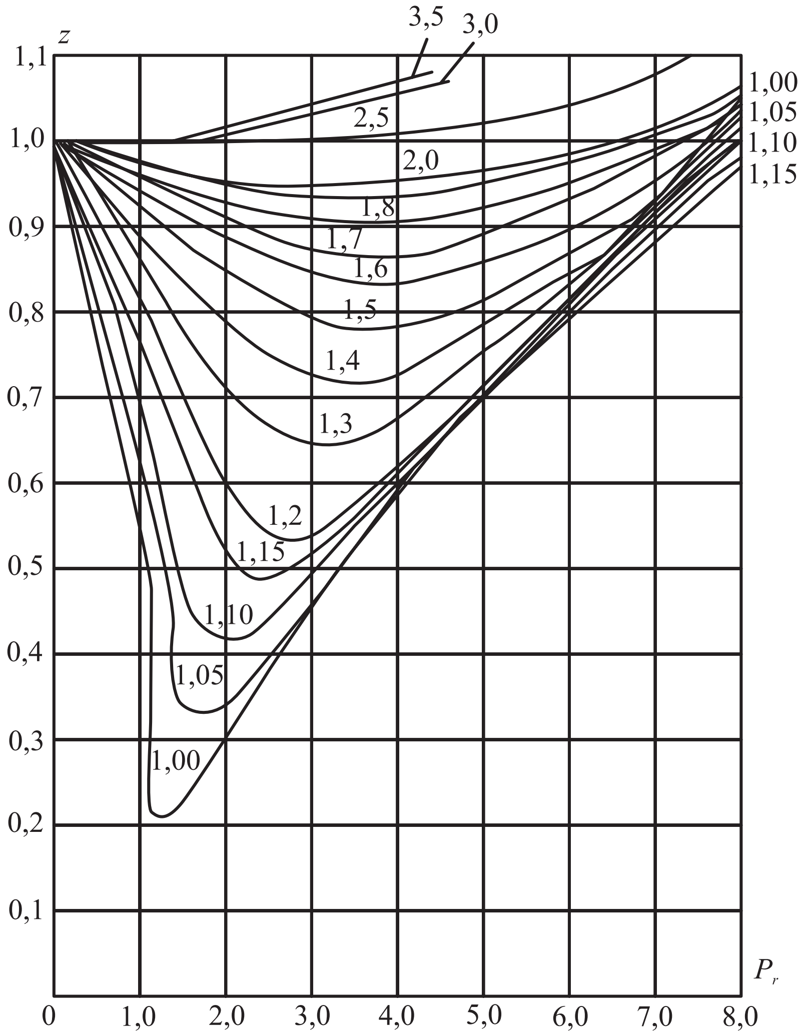
Bu ýerde (X.20) aňlatmany ulanyp, basyşyň gatlakda ýaýraýyş kanunyny şu görnüşde taparys:

$$P = \sqrt{P_k^2 - \frac{(P_k^2 - P_c^2)}{\ln \frac{R_k}{r_c}} \ln \frac{R}{r}}. \qquad (X.31)$$

Darsiniň kanuny boýunça kadalaşan tekiz radial filtrasiýasynda gatlakdaky gazyň basyşynyň orta bahasy şu formula bilen ýakynlaşan görnüşde hasaplanylýar:

$$\tilde{P} = P_k \left\{ \frac{1 - \left[\frac{P_c}{P_k}\right]^2}{2} \left[\frac{1}{2\ln \frac{R_k}{r_c}} - \frac{1}{\frac{R_k^2}{r_c^2} - 1} \right] \right\}. \qquad (X.32)$$

Uly basyşda real gaz halynyň deňlemesi Klapeýronyň deňlemesinden tapawutlanýar we şu görnüşli bolýar:



1-nji surat

$$\frac{P}{j} = ZRT, \tag{X.33}$$

bu ýerde $Z = Z(P_r T_r)$ – gazyň aşa gysyjylyk koeffisiýenti, ol real gazyň, ideal gazyň kanunyndan gyşarmasyny hasaba alýar we getirme basyşa hem-de temperatura bagly bolýar.

$$P_g = \frac{P}{P_{ort.kr.}}; \quad T_g = \frac{T}{T_{ort.kr.}} \tag{X.34}$$

we grafiki usul arkaly hasaplanýar (*1-nji surat*), bu ýerde $P_{ort.kp.}$ we $T_{ort.kp.}$ orta kritiki basyş we orta kritiki basyş we orta kritiki temperatura.

Hakyky (tebigy) gaz dürli komponentlerden (metan, etan, propan we başgalardan) durýar, şonuň üçin $P_{ort.kp.}$ we $T_{ort.kp.}$ bahasyny öňünden aşakdaky formulalar bilen hasaplamaly:

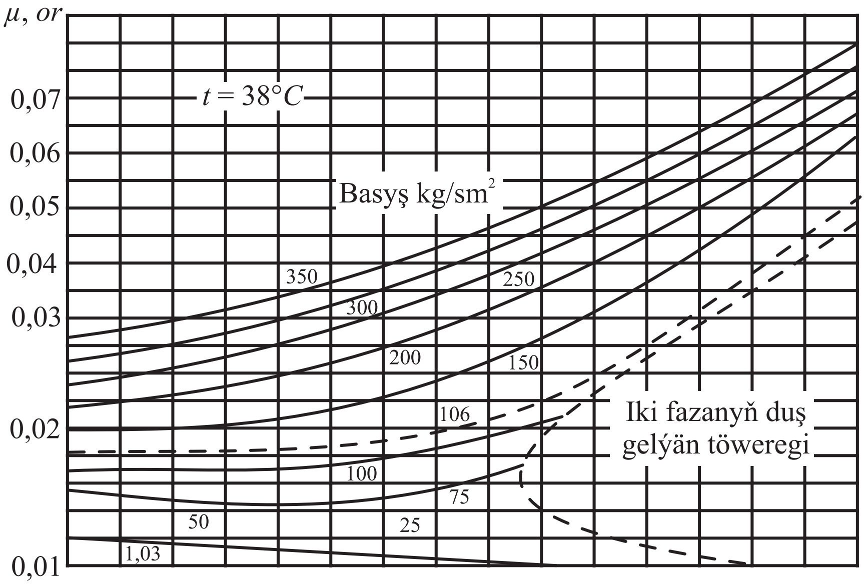
$$P_{ort.kr.} = \frac{\sum n_i P_{kr.i}}{\sum n_i}; \quad T_{ort.kr.} = \frac{\sum n_i T_{kr.i}}{\sum n_i}, \qquad \text{(X.35)}$$

bu ýerde n_i – % hasabynda I komponentiň gazda göwrümleýin tutýan bölegi, $P_{ort.kp.}$ we $T_{ort.kp.}$ – komponentiň kritiki basyşy we temperaturasy.

Tebigy gazyň şepbikliginiň dinamiki koeffisiýenti basyşa we temperatura bagly.

Gatlakda geçýän prosesi izotermiki diýip kabul edip μ (P) baglylygy hasaba almaly.

Tejribe derňewleriniň esasynda grafikler gurlan, şolara görä tebigy gazyň şepbikliginiň dinamiki koeffisiýenti howanyň otnositel udel agramyna baglylykda dürli basyşda we temperaturada 6%-e çenli takyklykda tapmak mümkin (*2-nji surat*).



2-nji surat

Real gazlaryň agramlaýyn debitini ýa-da basyşynyň gatlakdaky ýaýramagynyň kanunyny hasaplamak üçin gatlagyň gutarnyksyz kiçi elementi üçin Darsiniň kanunyny ýazmak gerek we μ (P) baglylygy, hem-de (X.33) formulany göz öňünde tutup, ony grafik analitiki usul bilen integrirlemeli. Eger basyş gatlakda kiçi aralykda üýtgese, onda P/μ (P) · z(P) gatnaşygy ýönekeý algebraik funksiýa bilen aproksimirläp bolýar we ony integrala alyp debiti we gatlakdaky basyşyň ýaýramak kanuny üçin analitiki aňlatmany tapyp bolýar.

10.3. Ideal gazyň iki agzaly kanuna laýyklykdaky filtrasion akymy

Köp önüm alynýan gaz guýularynyň gatlak töwereginde filtrasion akym Darsiniň kanunyna boýun egmeýär. Şol sebäpli hasap işler geçirilende iki agzaly filtrasion kanuna ýüz tutulýar:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{K} \cdot \vartheta + \beta \frac{\rho}{\sqrt{K}} \cdot \vartheta^2, \tag{X.36}$$

bu ýerde β – öýjükli sredanyň goşmaça konstantasy, tejribe arkaly kesgitlenýär.

Töwerekleýin gatlakda ýerleşen guýynyň debitini we onuň töwereginde basyşyň ýaýraýşyny tapaly.

Akymyň tizligi:

$$\vartheta = \frac{Q_m}{\rho F} \quad \text{bu ýerde} \quad Q_m = \rho_{at} Q_{at},$$

onda

$$\vartheta = \frac{\rho_{at} Q_{at}}{\rho_{at} \frac{P}{P_{at}} \cdot 2\pi rh} = \frac{Q_{at} P_{at}}{2\pi rhP}. \tag{X.37}$$

Formula (X.37)-den tizligiň bahasyny formula (X.36) goýup taparys:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{K} \frac{Q_{at} P_{at}}{2\pi rhP} + \rho_{at} \frac{P}{P_{at}} \frac{\beta}{\sqrt{K}} \frac{Q_{at}^2 P_{at}^2}{4\pi^2 r^2 h^2 P^2},$$

onda

$$PdP = \frac{\mu}{K}\frac{P_{at}Q_{at}}{2\pi h}\frac{dr}{r} + \frac{\rho_{at}P_{at}\beta \cdot Q_{at}^2}{4\pi^2 h^2\sqrt{K}}\frac{dr}{r^2}. \qquad (X.38)$$

Deňleme (X.38)-i guýynyň düýbünden saýlama nokada çenli integrirleýäris ($P = P_{sd}$, $r = r_s$)

$$\int_{P_{sd}}^{P} PdP = \frac{\mu P_{at}Q_{at}}{2\pi Kh}\int_{r_s}^{r}\frac{dr}{r} + \frac{\rho_{at}P_{at}\beta Q_{at}^2}{4\pi^2 h^2\sqrt{K}}\int_{r_s}^{r}\frac{dr}{r^2}, \qquad (X.39)$$

onda

$$P^2 - P_s^2 = \frac{\mu P_{at}Q_{at}}{\pi Kh}\ln\frac{r}{r_s} + \frac{\rho_{at}P_{at}\beta Q_{at}^2}{2\pi^2 h^2\sqrt{K}}\left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r}\right),$$

$$P = \sqrt{P_s^2 + \frac{\mu P_{at}Q_{at}}{\pi Kh}\ln\frac{r}{r_s} + \frac{\rho_{at}P_{at}\beta Q_{at}^2}{2\pi^2 h^2\sqrt{K}}\left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r}\right)}. \qquad (X.40)$$

Deňleme (X.38)-i guýynyň düýbünden konturyň çägine çenli integrirläp ($P_s \to P_k$) ($r_s \to R_k$) gaz akymynyň deňlemesini taparys:

$$P_k^2 - P_s^2 = \frac{\mu P_{at}Q_{at}}{\pi Kh}\ln\frac{R_k}{r_s} + \frac{\rho_{at}P_{at}\beta Q_{at}^2}{2\pi^2 h^2 r_s\sqrt{K}}, \qquad (X.41)$$

$$A = \frac{\mu P_{at}}{\pi Kh}\ln\frac{R_k}{r_s}, \qquad B = \frac{\rho_{at}P_{at}\beta}{2\pi^2 h^2 r_s\sqrt{K}}.$$

Onda deňleme (X.41)-i aşakdaky görnüşde ýazyp bolar

$$P_k^2 - P_s^2 = AQ_{at} + BQ_{at}^2. \qquad (X.42)$$

Guýularda durnuklaşan düzgünde derňew geçirip, A we B koeffisiýentleri tapmaly. Guýular 5–6 düzgünde (režimde) derňelýär, her düzgünde debit we guýynyň düýp basyşy ölçelýär.

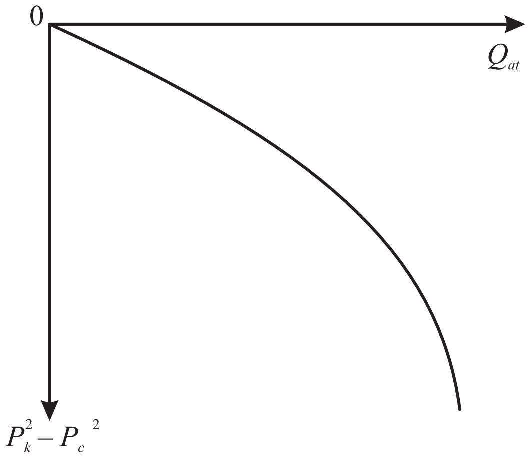
Guýyny doly ýapyp konturdaky basyşy kesgitleýäris – P_k.

Derňewiň maglumatlary esasynda indikator diagramma gurulýar (*3-nji surat*).

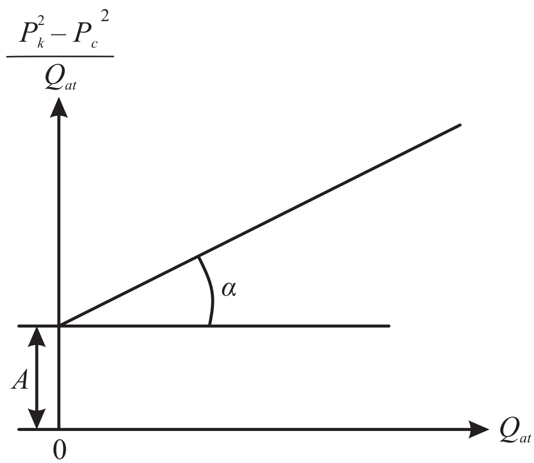
Soňky (X.42) deňlemäni aşakdaky görnüşde ýazýarys:

$$\frac{P_k^2 - P_s^2}{Q_{at}} = A + BQ_{at}. \qquad (X.43)$$

Bu deňlemäniň grafigi göniçyzyk bolýar (*4-nji surat*).



3-nji surat. Indikator diagrammasy



4-nji surat. Iki agzaly kanunyna laýyklykdaky filtrasion akymyň grafigi

Ordinat okda gönüçyzygyň kesişýän ýeri koeffisiýent A-ny berýär, absissa oka bolan burçuň tangensi koeffisiýent B bolar, tg$\alpha = B$. Tapylan A koeffisiýentiň esasynda kollektoryň häsiýetlerini tapyp bolar

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{P_{at}}{\pi A} \ln \frac{R_k}{r_s}. \qquad (X.44)$$

10.4. Real gazyň Darsiniň kanunyna laýyklykdaky tekiz – radial akymy

Ýokarda aýdylyşy ýaly, gatlak basyşy ýokary bolanda real gazyň hal deňlemesi Klapeýronyň hal deňlemesinden tapawutlanýar. Ýokary gatlak basyşda şepbeşikligiň basyşa baglylygy göz öňünde tutulmalydyr. Gatlagyň geçirijilik ukyby üýtgemeýär diýip hasap edilýär.

Onda Leýbenzonyň funksiýasy diýip aşakdaky aňlatmany göz öňünde tutarys

$$L = \int \frac{K\rho}{\mu} dP = \frac{K\rho_{at}}{P_{at}} \int \frac{PdP}{\mu(P)z(P)} + C.$$

Dýupýuiniň formulasynda göwrümleýin debiti Q massalaýyn bile çalşyp we $K\rho/\mu$ Leýbenzonyň funksiýasy bilen

$$Q_m = \frac{2\pi Kh(L_k - L_{sd})}{\ln\frac{R_k}{r_s}} = \frac{2\pi Kh\rho_{at}}{P_{at}\ln\frac{R_k}{r_s}} \int_{P_{sd}}^{P_k} \frac{P}{\mu(P)z(P)} dP.$$

Soňra atmosfera basyşa getirilen debiti tapýarys:

$$Q_{at} = \frac{Q_m}{\rho_{at}} = \frac{2\pi Kh}{P_{at}\ln\frac{R_k}{r_s}} \int_{P_s}^{P_k} \frac{P}{\mu(P)z(P)} dP.$$

Grafiklerden $z(P)$ we $\mu(P)$-ni tapýarys:

$$z(P_s) = z_s, \quad z(P_k) = z_k, \quad \mu(P_s) = \mu_s, \quad \mu(P_k) = \mu_k$$

we integralyň içindäki μ we z aşakdakylara deň diýip hasap edip bolar

$$\bar{z} = \frac{(z_{sd} + z_k)}{2}; \qquad \bar{\mu} = \frac{(\mu_{sd} + \mu_k)}{2}.$$

Onda

$$Q_{at} = \frac{2\pi Kh}{P_{at}\ln\frac{R_k}{r_s}} \frac{1}{\bar{\mu}\cdot\bar{z}} \int_{P_s}^{P_k} PdP = \frac{\pi Kh(P_k^2 - P_s^2)}{P_{at}\bar{\mu}\cdot\bar{z}\ln\frac{R_k}{r_s}}.$$

XI. GAZLAŞDYRYLAN SUWUKLYGYŇ KADALAŞAN FILTRASIÝASY

Eger-de gatlakdaky basyş doýgunlaşan basyşdan ýokary bolsa, onda gaz suwuklykda doly eräp, ol özüni birmeňzeş ýaly alyp barýar. Basyş doýgun basyşdan aşak düşende nebitden gaz köpürjikleriniň bölünip çykmagy bolup geçýär. Gatlakda guýynyň düýbüne ýakynlaşdygyça basyş aşak düşýär we köpürjikleriň ölçegi gazyň giňelmegi netijesinde ulalýar, şol bir wagtda nebitde täze gaz köpürjikleriniň bölünip çykmagy gaýtalanýar. Bu ýerde biz ikifazaly ulgamy emele getirýän gazlaşan suwuklygyň filtrasiýasy bilen iş salyşýarys (suwuklyk garyndysy we nebitden bölünip çykýan erkin gaz). Gazlaşan suwuklygyň filtrasiýasy geçende, her bir fazaň hereketi aýratyn seredilýär. Suwuk faza jynsyň bölejiginden we gaz köpürjiginden durýan üýtgeýän sredada, gaz fazasy bolsa suwuklykdan we jynsdan durýan üýtgeýän sredada hereketlenýär diýlip hasaplanýar.

Gatlakdaky nokatdan nokada üýtgeýän K_s, K_g fazalaýyn geçirijiligiň koeffisiýentlerini girizip, filtrasiýanyň çyzykly kanuny ýerine ýetirilýär diýip hasap edip, ol kanuny her faza üçin aýratyn ýazýarys:

$$Q_s = -\frac{K_s}{\mu_s}\frac{dP}{dS}F(S), \quad Q_g = -\frac{K_g}{\mu_g}\frac{dP}{dS}F(S), \qquad \text{(XI.1)}$$

bu ýerde Q – gatlak şertlerindäki erkin gazyň debiti.

Fazalaýyn geçiriş, köplenç, suwuk fazanyň – öýjük giňişliginiň doýgunlygyna baglydygy Wikowyň we Botsetiň tejribesinde anyklanan. Suwuk fazanyň eýelän öýjükli göwrüminiň öýjükli sredanyň hemme öýjük göwrümine bolan gatnaşygyna doýgunlyk – diýilýär. Otnositel fazalaýyn geçirijiligiň:

$$K_s^* = \frac{K_s}{K} \quad \text{we} \quad K_g^* = \frac{K_g}{K}, \tag{XI.2}$$

doýgunlygyna baglydygy grafikada görkezilen (*1-nji surat*). Bu ýerde K – birmeňzeş suwuklygyň filtrasiýasy netijesinde anyklanýan jynsyň absolýut geçirijiligi. Gazlaşdyrylan suwuklygyň filtrasiýa teoriýasynda gaz faktory diýen düşünjesi girizilýär.

Ol atmosfera basyşyna getirilen erkin we suwuklykda erän gazyň debitiniň, suwuklygyň debitiniň gatnaşygyna deňdir.

$$G = \frac{Q_{g\,at}}{Q_s}. \tag{XI.3}$$

Gazlaşdyrylan suwuklygyň kadalaşan filtrasiýasynda gaz faktoryň ululygy, akymyň çyzygynyň uzynlygy boýunça hemişeligine galýar.

Doýgunlyk – basyşyň bir alamatly funksiýasy bolmak bilen suwuk fazanyň K_S^* otnositel fazalaýyn geçirijiligini basyş bilen baglanyşdyryp, $K_S^*(P^*)$ grafigi gurmak mümkin. Bu ýerde ölçegsiz basyş:

$$P^* = \frac{P}{P_{at}\xi}, \qquad \xi = \Gamma\frac{\mu_g}{\mu_s}. \tag{XI.4}$$

Indi şu aňlatmany:

$$H = \int_0^P K_s^* dP. \tag{XI.5}$$

S. A. Hristianowiçiň funksiýasy diýip atlandyrýarys. Hristianowiçiň funksiýasynyň üsti bilen suwuk fazanyň debitini Darsiniň kanuny boýunça ýazýarys:

$$Q_s = -\frac{K}{\mu}\frac{dH}{dS}F(S). \tag{XI.6}$$

Bu formulada basyşyň ornuny funksiýa «*H*» tutýar. Meselem, gorizontal tegelek gatlagyň merkezinde ýerleşýän gazlandyrylan suwuklykly guýynyň suwuk fazasynyň debiti Dýupýuiniň formulasyna laýyklykda anyklanylýar:

$$Q_s = \frac{2\pi kh(H_k - H_c)}{\mu_s \ln\frac{R_k}{r_c}}. \qquad \text{(XI.7)}$$

l – uzynlykly gatlakdaky ini «*B*» bolan ýerasty gönüburçly galereýanyň suwuk fazasynyň debiti bolsa:

$$Q_s = \frac{K}{\mu_s}\frac{H_k - H_g}{l}Bh. \qquad \text{(XI.8)}$$

Hristianowiçiň funksiýasy gazlaşan suwuklygyň tekiz-radial filtrasiýasy şertlerinde logarifmiki ýaýrama kanuna boýun egýär:

$$H = H_k - \frac{H_k - H_c}{\ln\frac{R_k}{r_c}}\ln\frac{R_k}{r}, \qquad \text{(XI.9)}$$

parallel – akymly filtrasiýa bolsa, çyzykly kanuny boýun edýär

$$H = H_k - \frac{H_k - H_g}{l}x. \qquad \text{(XI.10)}$$

Lapugyň usuly boýunça hasaplanylanda Hristianowiçiň funksiýasynyň bahasyny tapmak üçin $K_s(P^*)$ grafigi ulanyp (*2-nji surat*), grafiki integrirleme usulyndan peýdalanyp, Hristianowiçiň ölçegsiz funksiýasy gurulýar.

$$H^* = \int_0^{P^*} K_s^* dP^*, \qquad \text{(XI.11)}$$

bu ýerde $\xi = \Gamma\frac{\mu_g}{\mu_s}$ ululyk hasaplanýar, soňra ölçegli basyşdan ölçegsiz basyşa şu formula arkaly geçilýär:

$$P^* = \frac{P}{P_{at}\xi}. \qquad \text{(XI.12)}$$

Grafik boýunça hasaplanan P^* ululyga gabat gelýän H^* ululygy tapylýar, soňra Hristianowiçiň ölçegli funksiýasyna geçirilýär:

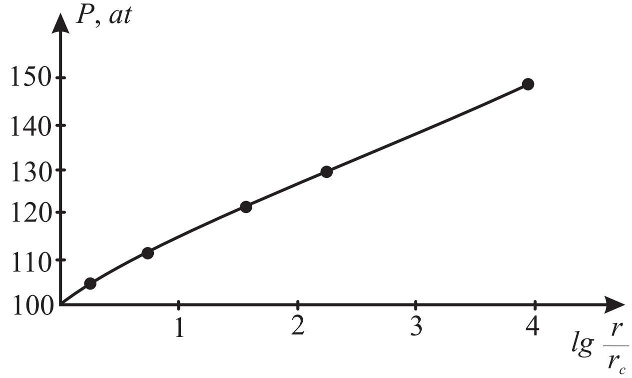
$$H = H^*\xi P_{at}. \qquad \text{(XI.13)}$$

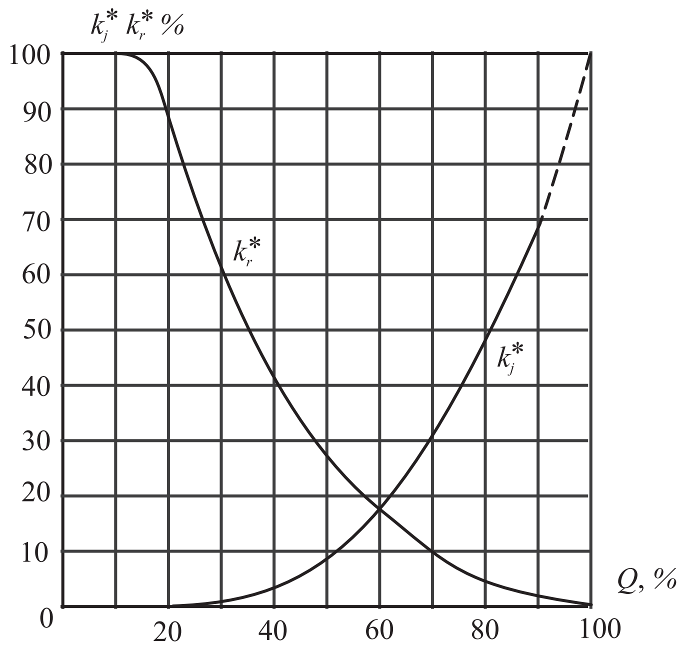
Gatlagyň käbir nokadyndaky basyşy tapmak üçin başda «*H*» funksiýanyň ululygyny (XI.10) ýa-da (XI.9) formulalar bilen hasaplanylýar. Soňra $H^*(P^*)$ grafigi baglanyşygy ulanyp, H ululyga laýyk gelýän basyşyna geçilýär.

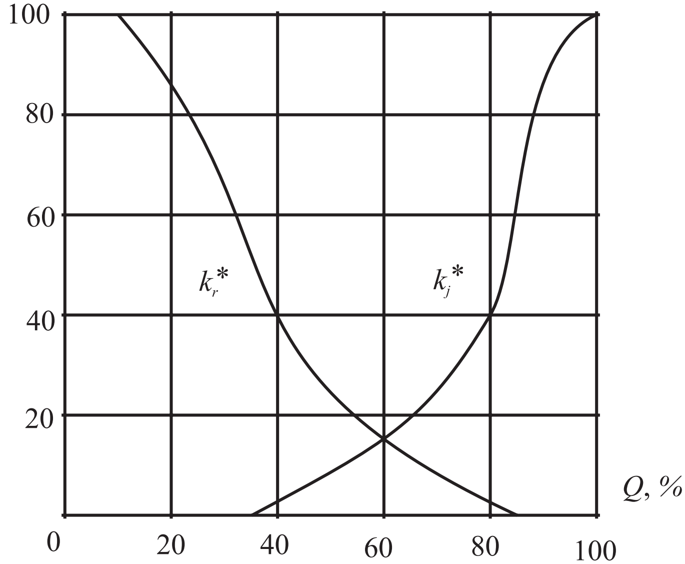
Hristianowiçiň funksiýasy basyşdan başga-da hem (gatlakdaky üýtgeýän ululyk)

$$\alpha = S\frac{\mu_g}{\mu_s}, \tag{XI.14}$$

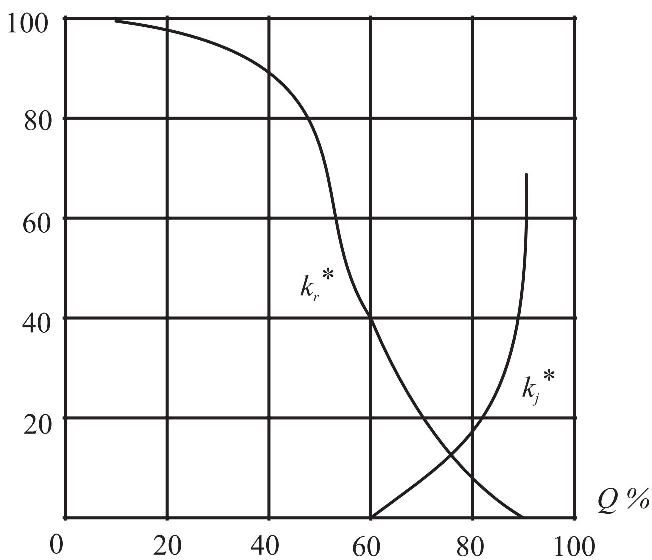
hemişelik parametre baglydyr. Bu ýerde S – suwuklykda gazyň göwrümleýin ereýiş koeffisiýenti.

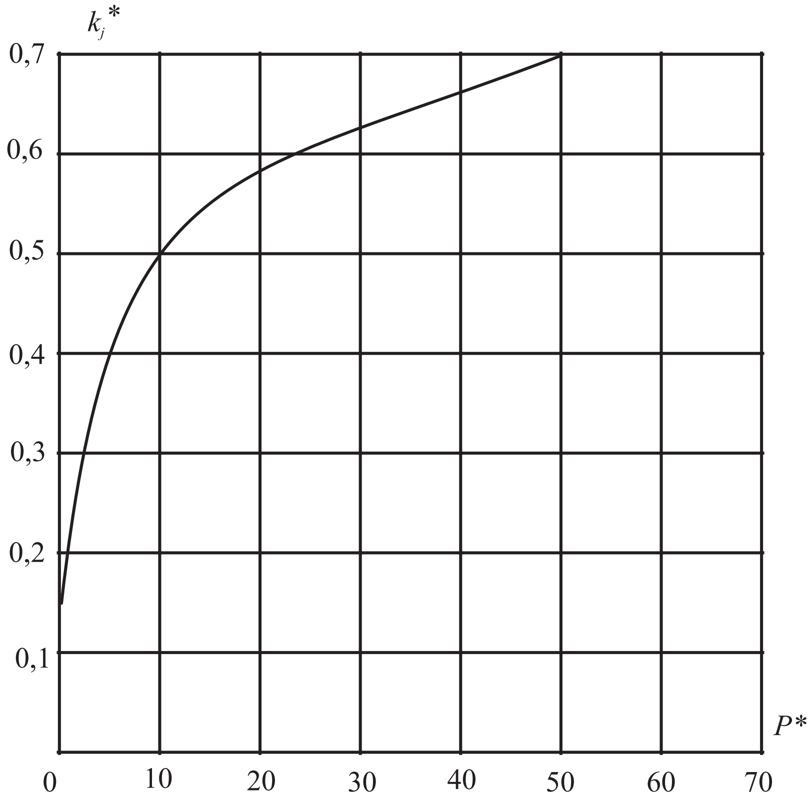





100
80
60
40
20
0
20
40
60
80
100
k_r^*
k_j^*
Q, %

1-nji surat


100
80
60
40
20
0
20
40
60
80
100
k_r^*
k_j^*
Q %



2-nji surat

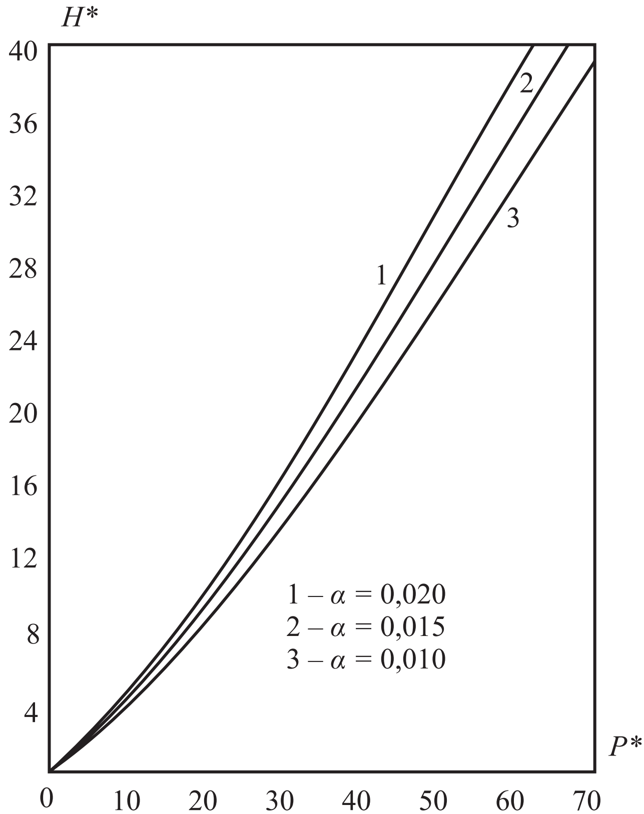
$H^*(P^*)$ baglanyşyk grafige laýyklykda P^* – ululygyň giňişleýin aralykda edil gönüçyzyga meňzeş şekillenýändigini (eger $P_c/P_k \geq 0,2$) I. A. Çarnyý tarapyndan bellenipdir, şonuň üçin baglanyşygy ýakynlaşan görnüşinde kabul etmek mümkin:

$$H^* = AP^* + B \quad \text{we şoňa görä} \quad H_k - H_c = A(P_k - P_c) \qquad \text{(XI.15)}$$

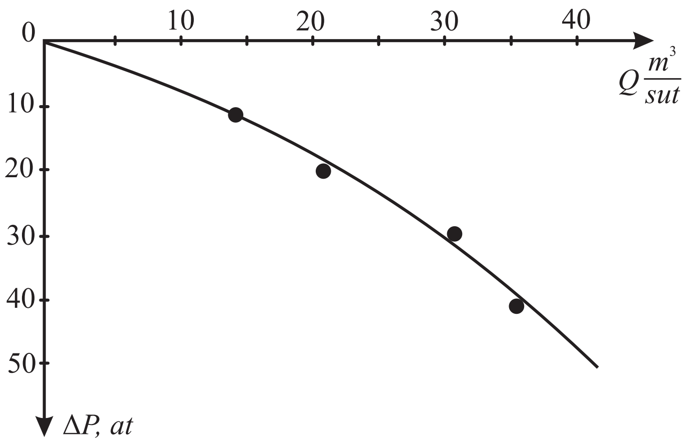
bu ýerde $A = 0,944 - 21,43\alpha$.

Eger-de gatlakdaky basyş giň çäklerde üýtgeýän bolsa, fazalaýyn geçirijilik K_s^* sähelçe üýtgeýär, şonuň üçin ony hemişelige ýakynlaşan diýip, hasaplamak bolar we gatlakdaky basyşyň orta ölçegine gabat gelýän fazalaýyn geçirijiligiň K_s ululygyna deň hasaplamak bolar diýip Pyhaçew belläpdir.

$$H_k - H_c = \widetilde{K_S}(P_k - P_c). \qquad \text{(XI.16)}$$



H*
40
36
32
28
24
20
16
12
8
4
0
10
20
30
40
50
60
70
P*
1
2
3
1 – α = 0,020
2 – α = 0,015
3 – α = 0,010



0
10
20
30
40
Q m³/sut
10
20
30
40
50
ΔP, at

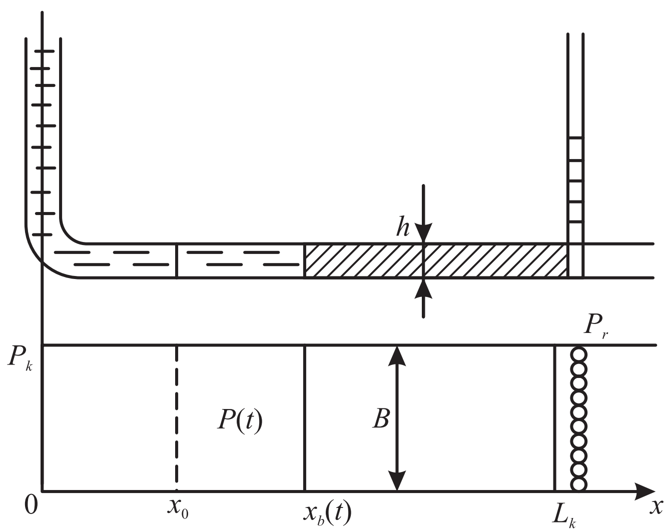
3-nji surat

XII. IKI SUWUKLYGYŇ BÖLÜNME ARAÇÄGINIŇ ÖÝJÜKLI SREDASYNDAKY HEREKETI

12.1. Gatlakdaky nebitiň suwbatlandyryjy düzgünde gönüçyzygyň parallel gysylyp süzülmegi

Suwbatlandyryjy düzgünde nebit, suwlaryň badyna guýa tarap süzülip çykýar. Şol wagt nebit öndürilýän çäk (iki suwuklygyň bölünme araçägi – SBA) guýa tarap çekilýär we şony göz öňünde tutmak hökmandyr.

Gysylyp çykmak prosesi «porşenleýin» geçýär diýip çaklanylýar. Bu bolsa şol SBA dikleýin (wertikal) seredilmegine mümkinçilik berýär. Nebitiň we suwuň şepbeşikliginiň tapawudy göz öňünde tutulýar.



1-nji surat

Gönüçyzyklaýyn parallel akymyň çyzgydy 1-nji suratda görkezilen. Iýmitlendiriji çäkdäki we galereýadaky basyş hemişelik saklanýar diýip hasap edilýär $P_g = const$, $P_k = const$. Başlangyç ýagdaýdaky nebit öndüriji çägiň aralygy X_0 we ol galereýa hem-de nebitiň iýmitlendiriji çägine parallel hasap edilýär.

Bu ýerde X_0 – nebitiň gysylyp çykmak prosesinde t wagt geçenden soň, nebit öndürýän çäge çenli aralyk, L_k – galereýadan iýmitlendiriji çäge çenli aralyk, P_s, P_n – gatlagyň suw ýa-da nebit tutýan nokadyndaky basyş, $P(t)$ – iki suwuklygyň bölünme araçägindäki basyş.

Bilşimiz ýaly, gatlakda bir suwuklygyň kadalaşan gönüçyzyklaýyn parallel akymy öz ýerini tutanda gatlakdaky basyşyň ýaýraýşy (paýlanyşy) we filtrasion tizligi aşakdaky deňlemelere laýyk gelýär:

$$P = P_k - \frac{P_k - P_g}{L_k} \cdot X = P_g + \frac{P_k - P_g}{L_k}(L_k - X) \qquad \text{(XII.1)}$$

$$\vartheta = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_g}{L_k}. \qquad \text{(XII.2)}$$

Izobaralar bolsa galereýa parallel bolýar we her izobarany galereýa diýip ýa-da iýmitlendiriji çäk diýip hasap edip bolar.

(XII.1) we (XII.2) deňlemelere esaslanyp, gatlagyň suwly zolagy üçin basyşyň ýaýraýşyny we filtrasion tizligini aşakdaky görnüşde ýazyp bolar

$$P_s = P_k - \frac{P_k - P(t)}{X_s(t)} \cdot X \quad \text{bu ýerde} \quad 0 \le X \le X_S(t) \qquad \text{(XII.3)}$$

$$\vartheta_s = \frac{K}{\mu_s} \cdot \frac{P_k - P(t)}{X_s(t)}. \qquad \text{(XII.4)}$$

Suwuklyklaryň bölünme araçägine gabat gelýän izobarany iýmitlendiriji çäk hasap edip gatlagyň nebitli zolagyndaky basyşyň paýlanyşyny we filtrasion tizligini taparys:

$$P_n = P_g + \frac{P(t) - P_g}{L_k - X_s(t)} \cdot (L_k - x) \quad \text{bu ýerden} \quad X_S(t) \le X \le L_k \qquad \text{(XII.5)}$$

$$\vartheta_s = \frac{K}{\mu_n} \cdot \frac{P(t) - P_g}{L_k - X_s(t)}. \qquad \text{(XII.6)}$$

Indi nebit bilen suwuň bölünme araçägindäki $P(t)$ basyşy tapýarys. Suwuklyk gysylmaýan we filtrasion akym üznüksiz bolany sebäpli akymyň çyzygy gönüçyzyklaýyn we OX oka parallel bolýar, filtrasion tizlik bolsa gatlagyň hemme nokatlarynda deň bolýar:

$$\vartheta_n = \vartheta_S$$

$$\frac{K(P_k - P(t))}{\mu_s X_s(t)} = \frac{K(P(t) - P_g)}{\mu_n (L_k - X_s(t))}. \qquad \text{(XII.7)}$$

Onda nebit bilen suwuň bölüniş araçägindäki basyş

$$P(t) = \frac{P_k \mu_n (L_k - X_S(t)) + P_g \mu_S X_S(t)}{\mu_S X_S(t) + \mu_n (L_k - X_S(t))}. \qquad \text{(XII.8)}$$

Indi nebitiň we suwuň filtrasion akymyny häsiýetlendirijileri tapýarys:

1. Gatlagyň nebitli we suwly zolaklaryndaky basyşy tapýarys. Onuň üçin (XII.3) we (XII.5) deňlemelere (XII.8) deňlemeden $P(t)$ bahasyny goýarys:

$$P_S = P_k - \frac{\mu_S (P_k - P_g)}{\mu_S X_S(t) + \mu_n (L_k - X_S(t))} \cdot X; \qquad \text{(XII.9)}$$

$$P_n = P_g + \frac{\mu_n (P_k - P_g)}{\mu_S X_S(t) + \mu_n (L_k - X_S(t))} \cdot (L_k - X). \qquad \text{(XII.10)}$$

2. Filtrasion akymyň tizligi. Onuň üçin (XII.4) we (XII.6) deňlemä (XII.8) deňlemeden $P(t)$ bahasyny goýarys:

$$\vartheta_n = \vartheta_S = \frac{K(P_k - P_g)}{\mu_S X_S(t) + \mu_n (L_k - X_S(t))}. \qquad \text{(XII.11)}$$

3. Galereýanyň debiti. Deňleme (XII.11) filtrasion akymyň kese kesik meýdanyna Bh köpeldýäris:

$$Q = \frac{K(P_k - P_g)}{\mu_S X_S(t) + \mu_n (L_k - X_S(t))} \cdot Bh. \qquad \text{(XII.12)}$$

4. Basyşyň gradiýenti (XII.9) we (XII.10) deňlemeleri X boýunça differensirleýäris:

$$\frac{\partial P_{(S)}}{\partial X}=-\frac{\mu_S(P_k-P_g)}{\mu_S X_S(t)+\mu_n(L_k-X_S(t))}, \quad \text{(XII.13)}$$

$$\frac{\partial P_{(n)}}{\partial X}=-\frac{\mu_n(P_k-P_g)}{\mu_S X_S(t)+\mu_n(L_k-X_S(t))}. \quad \text{(XII.14)}$$

5. Nebitiň we suwuň bölünme araçäginiň $X_s = X_s(t)$ hereketiniň kanunyny tizlikleriň aragatnaşygyndan tapýarys

$$\vartheta_{ort} = m\vartheta_S = m \cdot \frac{dX_S}{dt}, \quad \text{(XII.15)}$$

bu ýerden

$$dt = \frac{m}{\vartheta_{ort}} \cdot dX_S = \frac{m}{\dfrac{K(P_k-P_g)}{\mu_S X_S(t)+\mu_n(L_k-X_S(t))}} \cdot dX_S. \quad \text{(XII.16)}$$

Deňleme (XII.16) $0 - t$ we $X_0 - X$ çäklerde integrirläp taparys:

$$t = \frac{m}{K(P_k-P_g)} \cdot \left[\mu_n L_k(X_S - X_O) - \frac{1}{2}(\mu_n-\mu_S)(X_S^2 - X_O^2)\right]. \quad \text{(XII.17)}$$

Gatlakdan nebitiň doly gysylyp çykmagyna gerek bolan wagty – T-ni tapmak üçin (XII.17) deňlemede $X_s = L_k$ diýip taparys:

$$T = \frac{m}{2K(P_k-P_g)} \cdot [\mu_S((L_k^2 - X_O^2) + \mu_S)(L_k - X_O)^2]. \quad \text{(XII.18)}$$

(XII.17) kwadrat deňlemäni işläp suwuklygyň wagt t geçmegi bilen bölüniş araçäginiň X_s koordinatasyny tapyp bileris:

$$X_S = \frac{\mu_n}{\mu_n-\mu_S} \cdot L_k - \sqrt{\left(\frac{\mu_n}{\mu_n-\mu_S} \cdot L_k - X_O\right)^2 + \frac{2K(P_k-P_g)}{m(\mu_n-\mu_S)} \cdot t}. \quad \text{(XII.19)}$$

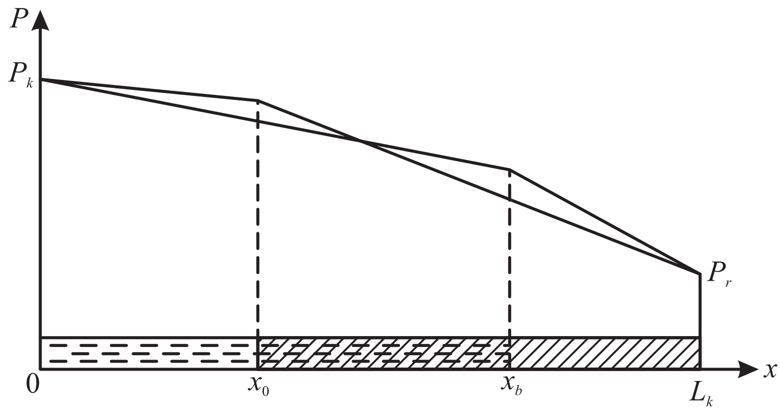
Filtrasion tizliginiň we debitiň wagta görä üýtgemegini tapmak üçin (XII.11) we (XII.12) deňlemä X_s bahasyny goýarys:

$$\vartheta = \frac{K(P_k-P_g)}{\sqrt{[\mu_n L_k - (\mu_n-\mu_S)\cdot X_O]^2 - \dfrac{2K(P_k-P_g)}{m} \cdot (\mu_n-\mu_S)\cdot t}}, \quad \text{(XII.20)}$$

$$Q = \frac{BKh(P_k - P_g)}{\sqrt{[\mu_n L_k - (\mu_n - \mu_S)\cdot X_O]^2 - \frac{2K(P_k - P_g)}{m}\cdot(\mu_n - \mu_S)\cdot t}}. \quad \text{(XII.21)}$$

a) (XII.9) we (XII.10) deňlemelerden görnüşi ýaly, gatlakdaky basyş diňe koordinata X bagly bolup durman, ol suwuklygyň bölüniş araçäginiň koordinatasyna X_s bagly bolup durýar. (XII.19) deňlemä laýyklykda X_s wagt geçmegi bilen ulanylýar, onda wagta görä gatlak basyşy suwly zolakda peselýär, nebitli zolakda bolsa ýokarlanýar. Başlangyç ýagdaýda suwuklygyň bölüniş araçäginiň koordinatasy X_0 bolsa, onda t wagtyň geçmegi bilen onuň koordinatasy X_s bolýar.

2-nji suratda t wagtyň geçmegi bilen gatlak basyşynyň paýlanyşy görkezilen.



2-nji surat

Suratda görnüşi ýaly, dürli fiziki düzümli iki suwuklygyň araçäginde akym çyzygynyň döwülmesi bolup geçýär (pýezometr çyzyk döwülýär).

b) depressiýa gatlakda hemişelik bolsa-da $\Delta P = const$, suwuklygyň filtrasion hereketi kadalaşmadyk bolýar.

Haçanda $\mu_n > \mu_S$ wagtyň geçmegi hem-de iki suwuklygyň bölünme araçäginiň süýşmegi bilen, filtrasion tizlik we galereýanyň debiti ösýär. Muňa düşmek kyn däl. Suwuklygyň hereketi üýtgemeýän basyş tapawudynda geçýär.

Suwuklyklaryň garşylyklary olaryň gatlakda tutýan göwrümine bagly. Wagt geçmegi bilen gatlakda suwuň tutýan göwrümi ösýär.

Şol sebäpli nebitiň tutýan göwrümi azalýar.

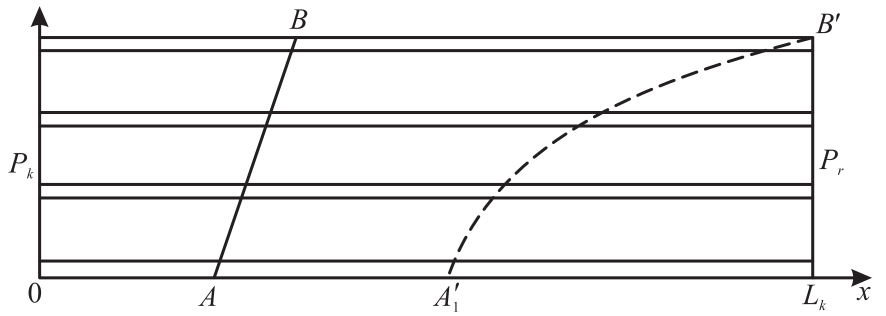
Gatlakdaky suwuklyklaryň döredýän garşylyklary peselýär, netijede filtrasion tizlik we debit ýokarlanýar.

ç) wagtyň geçmegi bilen suwly we nebitli zolakda döreýän basyş gradiýentleri ýokarlanýar.

Nebitiň şepbeşikligi näçe esse suwuňkydan ýokary bolsa, şonça hem nebit zolagynda döreýän gradiýent suwly zolakdaky gradiýentden ýokary bolar [(13, (14)] (*3-nji surat*).

Haçanda başlangyç ýagdaýda iki suwuklygyň bölünme araçägi *AB* galereýa parallel bolmanda, onda bu meseläni B. N. Şelkaçýowyň hödürleýän «zolaklar» usulyny ulanyp çözüp bolar.

Akymyň düzümini birnäçe darajyk zolaklara bölýäris we şol zolajyklarda iki suwuklygyň bölünme araçägine galereýa parallel diýip hasap etmek bolar we ýokarda çykarylan deňlemeler şol zolajykdaky hereketine laýyk gelýär.

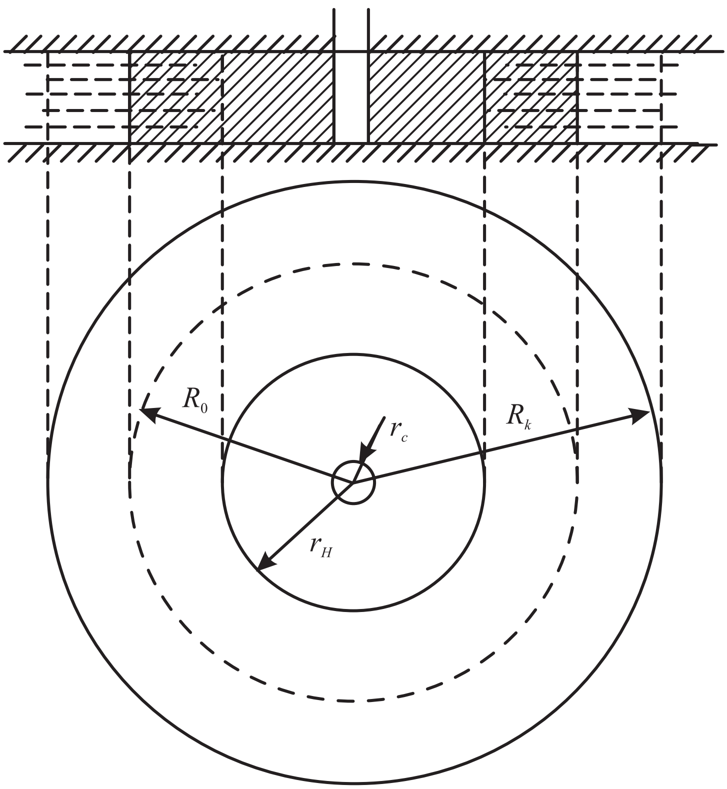


3-nji surat

(XII.20) deňlemeden görnüşi ýaly, X_0 näçe uly bolsa, şonça hem filtrasion tizlik ýokary bolýar. Şol sebäpli *B* nokatdaky iki suwuklygyň araçägi *A* nokadyndakydan tiz hereket eder we galereýany ilki *BB'* çyzykdan suw basyp başlar (başga zolajyklarda iki suwuklygyň bölünme araçägi daş hem bolsa).

12.2. Suwuň gatlakdaky nebiti gysyp tekiz-radial çykarmagy

Tekiz-radial filtrasion akymyň shemasy 4-nji suratda görkezilen. Gatlakdaky filtrasion akym Darsiniň kanunyna boýun egýär. Bu ýerde iýmitlendiriji çäkde gatlakdaky basyş $P_k = const$. Guýynyň düýbündäki basyş $P_{sd} = const$. Gatlagyň galyňlygy $h = const$, onuň geçirijilik ukyby $K = const$. Başlangyç we şu pursatdaky iki suwuklygyň bölünme araçägi – R_0 we r_n, P_s we P_n – gatlagyň suwly we nebitli zolagynyň islendik nokadyndaky basyş, P – iki suwuklygyň bölünme araçägindäki basyş.



4-nji surat. Tekiz-radial filtrasion akymyň shemasy

Bilşimiz ýaly, kadalaşan tekiz – radial filtrasion akym üçin gatlakdaky basyşyň paýlanyşy we şol akymyň filtrasion tizligini aşakdaky deňlemeler häsiýetlendirýär:

$$P = P_k - \frac{P_k - P_{sd}}{\ln\frac{R_k}{r_S}}\ln\frac{R_k}{r} = R_{sd} + \frac{P_k - P_{sd}}{\ln\frac{R_k}{r_S}}\ln\frac{r}{r_S},$$

$$\vartheta = \frac{K}{\mu}\cdot\frac{P_k - P_{sd}}{\ln\frac{R_k}{r_S}}\cdot\frac{1}{r}.$$

Iki suwuklygyň bölünme araçägindäki izobarany guýy diýip göz öňünde tutsak, onda zolakdaky basyşyň paýlanyşy we akymyň filtrasion tizligi aşakdaky görnüşde bolar:

$$P_S = P_k - \frac{P_k - P}{\ln\frac{R_k}{r_n}}\ln\frac{R_k}{r}, \qquad \text{(XII.22)}$$

$$\vartheta = \frac{K}{\mu_S}\cdot\frac{P_k - P}{\ln\frac{R_k}{r_n}}. \qquad \text{(XII.23)}$$

Indi şol izobarany gatlagyň iýmitlendiriji çägi diýip hasap etsek, onda nebitli zolakdaky basyşyň paýlanyşy we akymyň filtrasion tizligi aşakdaky görnüşde bolar:

$$P_n = P_{sd} + \frac{P - P_{sd}}{\ln\frac{r_n}{r_S}}\frac{r}{r_S}, \qquad \text{(XII.24)}$$

$$\vartheta_n = \frac{K}{\mu_n}\cdot\frac{P - P_{sd}}{\ln\frac{r_n}{r_S}}\frac{1}{r}. \qquad \text{(XII.25)}$$

Iki suwuklygyň bölünme araçäginde nebitiň we suwuň filtrasion tizlikleriniň deňligini göz öňünde tutsak, onda $r = r_n$ diýip şol araçäkdäki basyşy tapyp bileris

$$\frac{K}{\mu_S}\cdot\frac{P_k-P}{\ln\frac{R_k}{r_n}}\cdot\frac{1}{r_n}=\frac{K}{\mu_n}\cdot\frac{P-P_{sd}}{\ln\frac{r_n}{r_S}}\frac{1}{r_n},$$

onda

$$P=\frac{P_k\mu_n\ln\frac{r_n}{r_S}+P_{sd}\mu_S\ln\frac{R_k}{r_n}}{\mu_S\ln\frac{R_k}{r_n}+\mu_n\ln\frac{r_n}{r_S}}. \qquad \text{(XII.26)}$$

Indi nebitiň we suwuň filtrasion akymlarynyň häsiýetlendirijilerini tapyp bileris.

1. Iki suwuklygyň araçägindäki P basyşyň bahasyny (XII.26) deňlemeden (XII.22) we (XII.24) deňlemelere goýup, gatlagyň suwly we nebitli zolaklaryndaky basyşyň paýlanyşyny tapyp bileris:

$$P_S=P_k-\frac{\mu_S(P_k-P_{sd})}{\mu_S\ln\frac{R_k}{r_n}+\mu_n\ln\frac{r_n}{r_S}}\cdot\ln\frac{R_k}{r}, \qquad \text{(XII.27)}$$

$$P_n=P_S+\frac{\mu_n(P_k-P_{sd})}{\mu_S\ln\frac{R_k}{r_n}+\mu_n\ln\frac{r_n}{r_S}}\cdot\ln\frac{r}{r_S}. \qquad \text{(XII.28)}$$

Deňlemeler (XII.27) we (XII.28)-den görnüşi ýaly wagtyň geçmegi bilen suwly zolakda basyş azalýar, nebitli zolakda bolsa ösýär.

2. Deňlemeleri (XII.27) we (XII.28) differensirläp, gatlagyň her zolagyndaky basyşyň gradiýentini tapyp bileris:

$$\frac{\partial P_S}{\partial r}=\frac{\mu_S(P_k-P_{sd})}{\mu_S\ln\frac{R_k}{r_n}+\mu_n\ln\frac{r_n}{r_S}}\frac{1}{r}, \qquad \text{(XII.29)}$$

$$\frac{\partial P_n}{\partial r}=\frac{\mu_n(P_k-P_{sd})}{\mu_S\ln\frac{R_k}{r_n}+\mu_n\ln\frac{r_n}{r_S}}\frac{1}{r}. \qquad \text{(XII.30)}$$

Wagtyň geçmegi bilen iki zolakda gradiýentler ýokarlanýar. Nebit tutýan zolakdaky gradiýent suwly zolakdaky basyş gradiýentinden ýokary bolar. Şol nebitiň şepbeşikligi näçe esse suwuňkydan uly bolsa, şonça esse-de gradiýent hem ýokary bolar. Şol sebäpli iki suwuklygyň bölünme araçäginde pýezometriki çyzygyň döwülmesi bolýar.

3. Darsiniň kanunyna laýyklykda filtrasion tizlikler aşakdaky görnüşde bolar:

$$\vartheta_S = \frac{K}{\mu_S}\frac{\partial P_S}{\partial r}, \tag{XII.31}$$

$$\vartheta_n = \frac{K}{\mu_n}\frac{\partial P_n}{\partial r}. \tag{XII.32}$$

Şu formulalara basyş gradiýentiniň bahalaryny (XII.29) we (XII.30)-y goýup tizligi taparys

$$\vartheta_S = \frac{K(P_k - P_{sd})}{\mu_S \ln\frac{R_k}{r_n} + \mu_n \ln\frac{r_n}{r_S}}\frac{1}{r} R_n \geq r \geq r_n, \tag{XII.33}$$

$$\vartheta_n = \frac{K(P_k - P_{sd})}{\mu_S \ln\frac{R_k}{r_n} + \mu_n \ln\frac{r_n}{r_S}}\frac{1}{r} r_n \geq r \geq r_S. \tag{XII.34}$$

(XII.33) we (XII.34) deňlemelerden görnüşi ýaly, wagtyň geçmegi bilen maýdalawjy azalýar. Şol sebäpli filtrasion tizlikler zolaklaryň ikisinde hem ýokarlanýar.

4. ϑ – filtrasion tizligi, filtrasion meýdança $F=2\pi rh$-a bölüp guýynyň debitini taparys:

$$Q = \frac{2\pi Kh(P_k - P_{sd})}{\mu_S \ln\frac{R_k}{r_n} + \mu_n \ln\frac{r_n}{r_S}}. \tag{XII.35}$$

Gatlakdaky depressiýanyň hemişelik $\Delta P = const$ saklanýandygyna garamazdan, wagt geçmegi bilen debit ýokarlanýar.

5. Iki suwuklygyň bölünme araçäginiň hereket kanuny, filtrasion tizlik bilen hakykat tizligiň özara baglanyşygyndan tapylýar:

$$\vartheta = m \cdot \vartheta_n = -m\frac{dr_n}{dt},$$

bu ýerden

$$dt = -\frac{m}{\vartheta}dr_n = -\frac{m}{K(P_k - P_{sd})}\left(\mu_S \ln\frac{R_k}{r_n} + \mu_n \ln\frac{r}{r_S}\right)\cdot r_n dr_n. \quad \text{(XII.36)}$$

Deňleme (XII.36) integrirläp wagty taparys:

$$t = \frac{m}{K(P_k - P_{sd})}\int_{r_n}^{R_O}[(\mu_n - \mu_S)\cdot r_n \ln r_n - (\mu_n \ln r_S - \mu_S \ln R_k)\cdot r_n]\cdot dr_n =$$

$$= \frac{m}{2K(P_k - P_{sd})}\left[\mu_n\left(R_O^2 \ln\frac{R_O}{r_S} - r_n^2 \ln\frac{r_n}{r_S}\right) + \right.$$

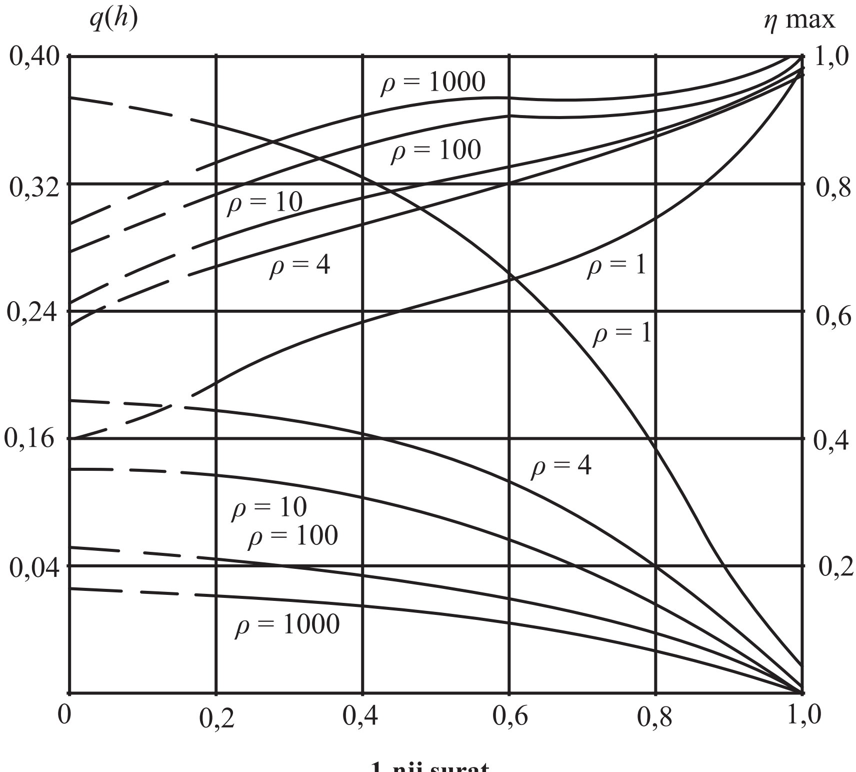
$$\left. + \mu_S\left(R_O^2 \ln\frac{R_k}{R_O} - r_n^2 \ln\frac{R_k}{r_n}\right) - \frac{\mu_n - \mu_S}{2}(R_O^2 - r_n^2)\right]. \quad \text{(XII.37)}$$

Gatlakdaky nebiti suwuň doly möçberde çykarjak möhletini (XII.37) deňlemede $r = r_s$ hasap edip tapylýar:

$$T = \frac{m}{2K(P_k - P_{sd})}\left[\mu_n R_O^2\left(\ln\frac{R_O}{r_S} - \frac{1}{2}\right) + \mu_S R_O^2\left(\ln\frac{R_k}{R_O} + \frac{1}{2}\right)\right]. \quad \text{(XII.38)}$$

XIII. GATLAK TEÝINDÄKI SUWLARYŇ KONUSY. GUÝYNYŇ SUWSUZ DEBITINIŇ ÇÄGINI HASAPLAMAK

Açylyş derejesi boýunça gidrodinamiki kämilleşmedik guýuda teý suwly gatlakdan nebit (gaz) alnanda, suw-nebit galtaşygynyň araçäginde deformasiýa bolup geçýär. Suw derejesiniň ýokarlanmagynyň emele gelşine teý suwuň konusy diýilýär (*1-nji surat*).



1-nji surat

Debitiň artmagy bilen konus ýokary göterilýär we debitiň käbir çäk ululygynda $Q = Q_{pred}$ teý suwlary böwsüp guýy geçýär. Konusyň durnuklaşma şertlerinde onuň depesindäki basyşyň gradiýenti suwuň udel agramyna deň bolýar.

$$\left|\frac{dP}{dz}\right|_{G=0} = \gamma. \tag{XIII.1}$$

O.A. Garder, G.J. Meýýer, D.A. Efros, N.S. Piskunow, N.F. Iwanow, I.A. Çarnyý we başgalar tarapyndan suwsuz debitiň çägini hasaplamak usuly hödürlenildi.

Haçanda birjynsly anizatrop gatlakda gorizontal ugruň her nokadyň geçirijilik koeffisiýenti, wertikal ugruň geçirijilik koeffisiýentinden mese-mälim tapawutlanýan diýsek, onda I.A. Çarnyý gatlakdan suwsuz alynjak debitiň ýokary çägini aşakdaky formula bilen kesgitleýär:

$$Q_1 = Q_O q(\overline{h}) = \frac{2\pi k h_O}{\mu} \Delta\gamma h_O q(\overline{h}) \tag{XIII.2}$$

$\Delta\gamma = \gamma_s - \gamma_n$; $\overline{h} = b/h_O$.

$q(\overline{h})$ – ölçegsiz debit we onuň $\rho = \dfrac{R_O}{\chi h_O}$ dürli ululyklar üçin arabaglanyşygy suratda egriler görnüşinde görkezilen (*1-nji surat*).

Bu ýerde

$$\chi = \sqrt{K_{GOR}/K_{WER}} \tag{XIII.3}$$

gatlagyň anizatroplygyny hasaba alýan koeffisiýent. Şeýle hem suratda Q_1 gabat gelýän konusyň $\gamma_{\max}$ ýokary galma beýikligini hasaplamak üçin:

$$\eta_{\max} = \frac{\gamma_{\max}}{h_O - b} \tag{XIII.4}$$

grafigi getirilen.

Suw konusyň depesi guýynyň düýbünde ýerleşýän predel ýagdaýyna seredip N.F. Iwanow onuň suwsuz debiti üçin ýakynlaşan formulany getirip çykardy.

$$Q = \frac{\pi k \Delta\gamma (h_O^2 - b^2)}{\mu \ln \dfrac{r_O}{r_c}}. \tag{XIII.5}$$

XIV. MAÝYŞGAK SUWUKLYGYŇ MAÝYŞGAK ÖÝJÜKLI SREDADA KADALAŞMADYK FILTRASIÝASY

14.1. Maýyşgak düzgün we onda häsiýetlendirilýän aýratynlyklar

Nebit we gaz känleri özleşdirilende, ulanylanda gatlakda kadasyz prosesler ýüze çykýar. Ol guýulardan alynýan flýuidleriň çykarylyşynyň depginine bagly bolup durýar. Ol prosesler gatlakda basyşyň wagt geçmegi bilen durnuklanyşyny häsiýetlendirýär.

Bu kadalaşmadyk prosesler gatlagyň we ony doldurýan suwuklyklaryň maýyşgaklyk häsiýetlerine bagly we gatlagyň esasy energiýasy bolup durýar.

Guýy peýdalanmaklyga goýberilende, ýa-da olar duruzylanda guýudan suwuklygyň alnyş depgini üýtgedilende, gatlakda kadasyz prosesler ýüze çykýar.

Şu kadasyz prosesleriň aýratynlygy gatlaklaryň we olary doldurýan suwuklyklaryň maýyşgak häsiýetine bagly. Suwuň, nebitiň we öýjükli sredanyň gysylyş koeffisiýentleri örän az bolsa-da $\beta_{suw}=4{,}5\cdot 10^{-5} sm^2/kg; \beta_{н}=(7-30)\cdot 10^{-5} sm^2/kg; \beta_{sk}=(0{,}3-2)\cdot 10^{-5} sm^2/kg$ gatlagyň we ony doldurýan suwuklygyň göwrümi örän uly bolup bilýänligi sebäpli suwuklyklaryň we gatlagyň maýyşgaklygy, gatlagyň we guýynyň ulanyş prosesinde alyp barşyna uly täsir edýär. Şonuň üçin nebitiň (gazyň) gory hasaplananda, nebit we gaz ýataklaryny işläp ulanmagy taslananda, peýdalanylanda, guýy derňelende, ýerasty gaz saklanýan ýerleri gurulanda, suwuklygyň we öýjükli sredanyň gysylyşyny göz öňünde tutmaly bolýar.

Basyş peselende gatlagy doldurýan suwuklygyň göwrümi ulalýar, onuň öýjükleriniň göwrümi bolsa kiçelýär. Bu hem gatlakdan suwuklygyň guýa gysylyp çykýandygyny takyklaýar. Eger nebiti çykaryş prosesinde energiýanyň esasy göwrümi gysylan suwuklygyň we gatlagyň maýyşgak deformasiýasynyň energiýasy bolsa, onda gatlakdaky süzüjilik düzgün maýyşgak düzgün diýlip atlandyrylýar. Şunlukda, filtrasion akymyň bir fazaly gatlagynyň basyşy doýgun basyşdan ýokary diýlip çaklanylýar. Maýyşgak düzgüniň şertinde gatlakdaky basyşyň ýaýraýyş prosesi haýal bolup geçýär.

14.2. Gatlakdaky suwuklygyň maýyşgaklyk goruny hasaplamak

Basyş peselende kollektoryň we ony doldurýan suwuklyklaryň göwrümleýin maýyşgaklygynyň hasabyna gatlakdan alynýan suwuklygyň mukdaryna, suwuklygyň maýyşgaklyk göwrümi diýip düşünilýär.

Suwuklygyň we gatlagyň göwrümleýin maýyşgaklyk koeffisiýentleri kiçi hem bolsa, olaryň tutýan göwrümi uly bolýar. Şol sebäpli suwuklygyň maýyşgaklyk gory hem ýokary bolup biler.

Gatlakda basyş peselende suwuklygyň maýyşgaklyk gory pese düşýär, basyş ýokary galanda ol köpelýär.

Suwuklygyň maýyşgaklyk goruny hasaplamak üçin gatlagyň elementiniň V_0 göwrümine seredeliň. Şol göwrümi P_0 basyşda doldurýan suwuklygyň göwrümini V_{OS} belleýäris. Basyş ΔP üýtgände, V_0 göwrümdäki suwuklygyň maýyşgak gorunyň üýtgeýşini ΔV_g belleýäris. Onda

$$\Delta V_g = \beta_s V_{os} \Delta P + \beta_{sk} \cdot V_o \cdot \Delta P. \qquad \text{(XIV.1)}$$

Gatlagyň elementiniň V_o başlamaga göwrümi şol elementdäki doly öýjükleriň göwrümine deň diýsek:

$$V_{os} = mV_o, \qquad \text{(XIV.2)}$$

bu ýerde m – gatlagyň öýjüklik koeffisiýenti.

Onda (XIV.1) we (XIV.2) göz öňünde tutup ýazyp bolar:

$$\Delta V_g = (m\beta_s + \beta_{sk}) \cdot V_o \Delta P, \qquad \text{(XIV.3)}$$

ýa-da

$$\Delta V_g = \beta^* V_o \Delta P, \qquad \text{(XIV.4)}$$

bu ýerde

$$\beta^* = m\beta_s + \beta_{sk} \qquad \text{(XIV.5)}$$

β^* – gatlagyň maýyşgak sygymynyň koeffisiýenti;
β_s – suwuklygyň gysylma koeffisiýenti;
β_{sk} – gatlagyň skeletiniň gysylma koeffisiýenti.

14.3. Maýyşgak suwuklygyň differensial deňlemesi

Umumy gysylýan suwuklygyň differensial deňlemesine ýüzlenýäris we $K = const$ hem $\mu = const$ hasap edýäris:

$$\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} = \frac{K}{\mu} \cdot \nabla^2 L. \qquad \text{(XIV.6)}$$

Maýyşgak suwuklygyň hal deňlemesini ýazýarys:

$$\rho = \rho_o[1 + \beta_S(P - P_o)], \qquad \text{(XIV.7)}$$

$$m = m_o + \beta_{sk}(P - P_o). \qquad \text{(XIV.8)}$$

Deňleme (XIV.8)-i deňleme (XIV.7)-ä köpeldip, $m \cdot \rho$-ny taparys:

$$m\rho = m_o\rho_o + (m_o\rho_o\beta_s + \rho_o\beta_{sk}) \cdot (P - P_o) + \rho_o\beta_{sk}\beta_s(P - P_o)^2. \qquad \text{(XIV.9)}$$

Deňleme (XIV.9) soňky agzasyna ýüzleý seredýäris:

$$m\rho = m_O\rho_O\left[1 + \frac{\beta^*}{m_O}(P - P_O)\right]. \qquad \text{(XIV.10)}$$

Differensirläp ýazmak bolar:

$$\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} = \rho_O\beta^* \frac{\partial P}{\partial t}. \qquad \text{(XIV.11)}$$

Maýyşgak suwuklyk üçin Leýbenzonyň funksiýasy şu görnüşde ýazylýar:

$$L = \frac{\rho_O}{\beta_S} + \rho_O(P - P_O) + C = \rho_O P + C. \qquad \text{(XIV.12)}$$

Koordinatlar boýunça (XIV.12) deňlemäni iki gezek differensirläp goşsak, onda

$$\nabla^2 L = \rho_o \nabla^2 P. \qquad \text{(XIV.13)}$$

(XIV.11) we (XIV.13) deňlemelerde bahalaryny deňleme (XIV.6)-da goýup tapýarys:

$$\rho_O \beta^* \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{K}{\mu} \cdot \rho_O \nabla^2 P,$$

ýa-da

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right), \qquad \text{(XIV.14)}$$

bu ýerde

$$\chi = \frac{K}{\mu \beta^*}. \qquad \text{(XIV.15)}$$

Deňleme (XIV.15) maýyşgak düzgüniň esasy differensial deňlemesi bolup durýar.

14.4. Maýyşgak düzgüniň esasy deňlemeleri

Maýyşgak düzgüniň teoriýasynda iki görkeziji parametr uly rol oýnaýar:

1) gatlagyň maýyşgak sygymynyň koeffisiýenti

$$\beta^* = m\beta_s + \beta_{sk} \qquad \text{(XIV.16)}$$

bu ýerde m – öýjüklik (poristost), β_{sk} we β_s degişlilikde, öýjükli sredanyň we suwuklygyň gysyjylyk koeffisiýenti, β^* – koeffisiýentiň ululygy, gatlakdaky basyş bir birlik üýtgände suwuklygyň maýyşgaklyk gory, bir birlik göwrümleýin üýtgeýşine bahalaýyn deň.

Käbir ýagdaýda gatlagyň maýyşgaklyk koeffisiýentiň ýerine, getirilen maýyşgaklyk moduly ulanylýar:

$$K = \frac{1}{\beta_S + \frac{1}{m}\beta_{sk}} = \frac{m}{\beta^*}. \qquad \text{(XIV.17)}$$

2) gatlagyň pýezogeçirijilik (pýezoprowodnost) koeffisiýenti

$$\chi = \frac{K}{\mu\beta^*} = \frac{k}{\mu}\frac{K}{m}. \qquad \text{(XIV.18)}$$

Ol maýyşgak düzgün şertinde, gatlakdaky basyşyň ýaýraýyş yzygiderligini tempini häsiýetlendirýär. Bu ululyk ýylylyk berijilik teoriýasyndaky ýylylyk – geçirijilik koeffisiýentine meňzeş we birinji gezek professor W. N. Şelkaçew tarapyndan girizildi. Maýyşgak düzgünde, filtrasiýanyň differensial deňlemesini şu görnüşde ýazmak mümkin:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi\left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}\right]. \qquad \text{(XIV.19)}$$

Differensial deňlemäni berlen başlangyç we araçägi şertlerde integrirläp, islendik wagt momentinde gatlagyň islendik nokadyndaky basyşy hasaplanýar.

Guýyny hemişelik debit – Q bilen goýberilenden soň gatlakdaky basyşyň täzeden ýaýraýyş (gutarnyksyz gorizontal gatlak üçin), ýokarda görkezilen differensial deňlemäni integrirlemegine getirilýär, onda deňleme tekiz – radial filtrasiýa üçin şu görnüşde bolýar:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi\left[\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}\right], \qquad \text{(XIV.20)}$$

başlangyç araçäk şertinde: $P(r, t) = P_k$ haçanda $t = 0$

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu}\left[r\frac{\partial p}{\partial r}\right]_{\Gamma = 0}, \qquad \text{(XIV.21)}$$

$$P(r;\, t) = P_k \quad \text{haçanda} \quad r = \infty.$$

Şu meseläniň takyk çözülişi haçan $r_c = 0$, aşakdaky formulada berilýär.

$$P_k - P(r,t) = -\frac{Q\mu}{4\pi hk}E_i\left[-\frac{r^2}{4\chi t}\right], \qquad \text{(XIV.22)}$$

bu ýerde

$$E_i\left[-\frac{r^2}{4\chi t}\right] = \int_{\frac{r^2}{4\chi}} \frac{l^{-u}}{u}du. \qquad \text{(XIV.23)}$$

Bu tabulirlenen funksiýa integral ekspotensialy ýa-da görkezijili integral funksiýa diýip atlandyrylýar.

$\frac{r^2}{4\chi t}$ argumentiň kiçi bahalarynda $-E_i\left[-\frac{r^2}{4\chi t}\right]$ funksiýany ýakynlaşan formula bilen çalyşmak mümkin:

$$-E_i\left[-\frac{r^2}{4\chi t}\right] = \ln\frac{4\chi t}{r^2} - 0,5772 \qquad \text{(XIV.24)}$$

onda

$$P_k - P(r,t) = \frac{Q\mu}{4\pi hk}\left[\ln\frac{4\chi t}{r^2} - 0,5772\right]. \qquad \text{(XIV.25)}$$

Şu formula gatlagyň maýyşgak düzgüniniň esasy formulasy bolup, haçanda $Q = const$ debitli guýy goýberilende, gatlakdaky basyşyň täzeden ýaýraýyş prosesi öwrenilende, guýy duruzylanda, alnyşyň tertibi üýtgedilende we ş.m. giňden peýdalanylýar.

Ýerasty gönüburçly galereýa ýarym gutarnyksyz gatlakda ýerleşen we düýbünde P_r hemişelik basyş bar diýsek (*1-nji surat*), onda ol gönüburçly galereýa maýyşgak suwuklygyň kadasyz filtrasiýasy düzgüninde, gatlagyň islendik nokadyndaky basyşy aşakdaky deňlemäni integrirläp alarys:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}. \qquad \text{(XIV.26)}$$

Başlangyç araçäk şertinde

$P(x, t) = P_k$	haçanda	$t = 0$
$P(x, t) = P_r$	haçanda	$x = 0$
$P(x, t) = P_k$	haçanda	$x = \infty$

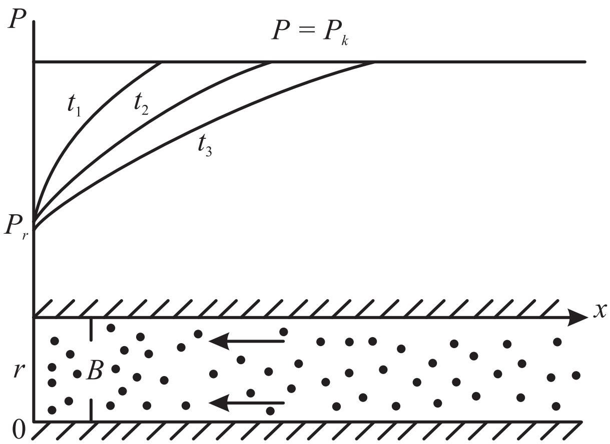
çözüliş şu formula bilen aňladylýar:

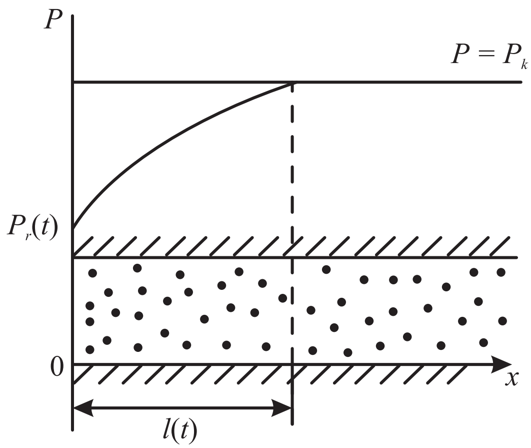
$$P(x, t) = P_k - (P_k - P_r)(1 - erf\xi), \qquad \text{(XIV.27)}$$

bu ýerde

$$\xi = \frac{\chi}{2\sqrt{\chi\, t}}. \qquad \text{(XIV.28)}$$

$erf\xi = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\xi} - e^{-u^2}$ – mümkinçilik (weroýatnost) integraly.





1-nji surat

Maýyşgak suwuklygyň kadalaşmadyk filtrasiýasynda, meseläni takyk çözülmeginiň kynçylyklary sebäpli, dürli ýakynlaşan çözüliş usullary teklip edildi. Köp ýaýran ýakynlaşan usulyň biri stasionar halyny yzygider çalyşma usuly bolýar. Şu usul, haýsy hem bolsa wagtyň bir momentinde, pes basyşly zolak (zona) belli aralyga, $l=l(t)$ ýaýraýar we üýtgeýän hereketi kadalaşan ýagdaýdaky ýaly bolýar diýip hasaplanýar. Hakykatda bolsa basyşyň gatlakda ýaýraýşy stasionar bolmaýar we teoretiki pes basyşly zolak gatlagy tutuşlygyna tutýar. Getirme radiusyň wagt boýunça üýtgeýşi l (t), material balans şertinde takyklanýar. Maýyşgak suwuklygyň ýerasty gönüburçly galereýa kadalaşmadyk ýagdaýynda

$$l(t) = 2\sqrt{xt}, \tag{XIV.29}$$

eger-de depressiýa

$$P_k - P_r = const$$

hem-de

$$l = 2\sqrt{\chi t} \quad \text{haçanda} \quad Q(0, t) = const.$$

Maýyşgak suwuklygyň tekiz-radial filtrasiýasy bolanda 10–15% takyklykda hasaplamak mümkin, $l = 2\sqrt{\chi t}$ eger $l(t) >> r_c$ haçan $\Delta P = const$ ýa-da $Q = const$ ýagdaýy üçin A. Periwerdiýanyň usulynda, stasionar halyny yzygider çalyşma usulynyň ösüşi bolup, basyşyň epýurasynda burç nokady bolmaz ýaly berilýär. Galereýa üçin basyşyň gatlakdaky ýaýraýşy parabola görnüşde berilýär. Şol parabolada $x = l(t)$ nokatdaky galtaşmasy gorizontaldyr. Eger suwuklygyň alnyşy wagtyň geçmesi bilen üýtgemese:

$$Q(0, t) = \omega_1 \omega = const$$

onda,

$$P(x,t) = P_K - (P_K - P_G)\left[1 - \frac{\chi}{l(t)}\right]^2, \tag{XIV.30}$$

bu ýerden

$$P_K - P_G = \sqrt{\frac{3}{2}\frac{\mu}{K}\omega_1\sqrt{\chi t}}, \tag{XIV.31}$$

material balansyň deňlemesinden tapylyp, getirme radiusy aşakdaky formula bilen hasaplanylýar.

$$l(t) = \sqrt{6xt}. \tag{XIV.32}$$

Superpozisiýa usuly hem maýyşgak düzgünde kadalaşmadyk akymyň meselelerinde giňden peýdalanylýar.

Eger-de gatlakda guýular topary işleýän bolsa, haýsy hem bolsa bir nokatda belli guýularyň döredýän basyş peselmeleri goşulyp tapylýar.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{n} \Delta P_i = \frac{\mu}{4\pi kh}\sum_{i=1}^{n} Q_i\left[-E_i\left[-\frac{r_i^2}{4\chi t}\right]\right], \tag{XIV.33}$$

bu ýerde n – guýularyň sany, O_i-nji guýynyň debiti, $Q>0$ eger guýy peýdalanyjy (ekspluatasion) bolanda, $O_i<0$ eger guýy özüne ýygnaýjy (nagnetatel) bolanda, r_i – guýynyň basyşynyň peselmegi hasaplanylýan nokada çenli aralyk. Eger guýular dürli wagtda işläp başlan bolsalar onda:

$$\Delta P = \frac{\mu}{4\pi kh}\sum_{i=1}^{n} Q_i\left[-E_i\left[-\frac{r_i^2}{4\chi t_i}\right]\right], \qquad \text{(XIV.34)}$$

bu ýerde t^i – 1-nji s guýynyň işläp başlamagyndan bäri geçen wagty.

Superpozisiýa usuly ulanyp, guýy işe goýberilende, duruzylanda, ýa-da guýynyň alnyş tertibi üýtgedilendäki meseleleri çözmek mümkin. Meselem goý, guýy hemişelik Q debit bilen peýdalanmaklyga goýberilen bolsun we wagt aralygy T geçenden soň duruzyldy. Gatlagyň islendik nokadyndaky basyşy hasaplamak talap edilsin. Meseläni çözmek üçin teklip edeliň; guýy öňki debitde işlemegini dowam edýär: onda duruzylandan soň wagtyň (t) möhletine çenli, üznüksiz işleýän guýyny goýbermekden ýüze çykan basyşyň peselmesini, gatlagyň haýsy hem bolsa bir nokadynda deň bolýar:

$$\Delta P_1 = \frac{Q\mu}{4\pi kh}\left\{-E_i\left[-\frac{r_i^2}{4\chi(T+t)}\right]\right\}. \qquad \text{(XIV.35)}$$

Duruzylandan soň peýdalanyjy guýynyň ýerleşen ýerinde şol debit bilen ýygnaýjy guýy işläp başlady diýip pikir ýaýradalyň.

Ýygnaýjy guýynyň goýberilmegi netijesinde gatlagyň haýsy hem bolsa bir nokadynda (t) möhletine basyşyň ýokarlanmagy aşakdaky formula bilen hasaplanylýar:

$$\Delta P_2 = \frac{Q\mu}{4\pi kh}\left\{-E_i\left[-\frac{r_i^2}{4\chi t}\right]\right\}. \qquad \text{(XIV.36)}$$

Onda ΔP basyşyň peselmesiniň jemini şu görnüşde ýazyp bolýar:

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{Q\mu}{4\pi kh}\left\{-E_i\left[-\frac{r_i^2}{4\chi(T+t)}\right] + E_i\left[-\frac{r_i^2}{4\chi t}\right]\right\}. \qquad \text{(XIV.37)}$$

Eger funksiýalaryň argumenti az bolsa, onda ýakynlaşan formulany ulanmak mümkin:

$$\Delta P = \frac{Q\mu}{4\pi kh}\ln\frac{T+t}{t}. \qquad \text{(XIV.38)}$$

14.5. Guýularda geçirilýän derňewleriň maglumatlary esasynda gatlagyň kollektoryny häsiýetlendirýän parametrleri kesgitlemek

Guýular işe goýberilende, ýa-da duruzylanda onuň düýbünde we onuň töweregindäki täsir edýän guýularda uzak möhletleýin basyş paýlanyşy dowam edýär. Özi ýazýan manometrleriň kömegi bilen basyşyň ösüşi ýa-da peselişi alynýar we şonuň esasynda, wagt geçmegi bilen basyşyň üýtgemeginiň grafigi gurulýar. Oňa basyşyň dikelmeginiň egri çyzygy diýilýär *KWD* (*BDEÇ*).

Guýularda gidrodinamiki barlaglar (derňewler) geçirilende, köp wagtlaýyn hemişelik debit – Q bilen işleýän guýulary duruzyp (ýapyp) onuň düýbünde basyşyň ösüşini derňeýärler.

Gatlagyň kollektor häsiýetleri basyşyň çyzygynyň şekiline täsir edýär. Şuny göz öňünde tutup *KWD* şekili boýunça kollektoryň häsiýetleri (geçirijilik ukyby, pýezogeçirijiligi) kesgitlenýär. Real ýagdaýda grafikleriň şekili örän çylşyrymly bolup biler. *KWD* grafiginiň (egri çyzygyň) çözgüdini tapmak üçin basyşyň şol egri çyzygy göneldilýär. Eger-de basyşyň dikelmeginiň egri çyzygyny $\Delta P = f(t)$, ýarym logarifmiki koordinata $\Delta P = f(\lg t)$ geçirsek, onda ol egri çyzygyň şekili gönelýär.

Basyşyň – ΔP dikelmegi, wagtyň logarifmiki – lg t, gönüçyzyklaýyn baglanyşygyny tassyklamak kyn däl.

Maýyşgak düzgüniň teoriýasynyň esasy formulasyny ulanyp, hemişelik debitli – Q işe goýberilen guýynyň düýbündäki basyşyň we işledilenden soň geçen wagtyň arasyndaky funksional baglanyşyk aşakdaky ýaly bolar:

$$\Delta P = P_k - P_S = \frac{Q\mu}{4\pi kh}\left[-\varepsilon_i\left(-\frac{r^2}{4\chi t}\right)\right] \approx \frac{Q\mu}{4\pi kh}\left(\ln\frac{4\chi t}{r_S^2} - 0,5772\right) =$$

$$= \frac{Q\mu}{4\pi kh}\left(\ln\frac{4\chi t}{r_S^2} - \ln 1,781\right) = \frac{Q\mu}{4\pi kh}\left(2,3\lg\frac{4\chi t}{1,781 r_S^2}\right) =$$

$$= 0,1832\frac{Q\mu}{Kh}\lg\frac{2,246\chi t}{r_c^2}. \qquad \text{(XIV.39)}$$

Soňky aňlatmany şu görnüşde hem ýazyp bolar:

$$\Delta P_S = 0,1832\frac{Q\mu}{Kh}\lg\frac{2,246\chi}{r_c^2} + 0,1832\frac{Q\mu}{Kh}\lg t, \qquad \text{(XIV.40)}$$

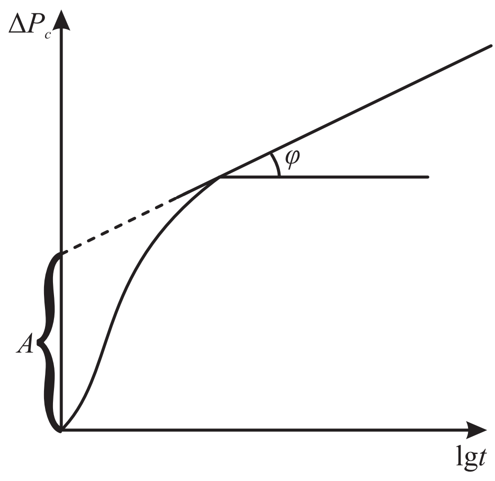
onda

$$P_s = A + Blgt. \qquad \text{(XIV.41)}$$

Bu ýerde

$$A = B\cdot\lg\frac{2,246\chi}{r_S^2}, \qquad B = 0,1832\frac{Q\mu}{Kh}. \qquad \text{(XIV.42)}$$

Şu formulalara görä hakykatdan hem hemişelik Q debitli işe göýberilen guýynyň düýbüne basyşyň diklemegi wagtyň logarifmikasynyň – lg$t$ çyzyklaýyn funksiýasydygyny tassyklaýar.



2-nji surat

Onda ýokarda görkezilen formulalary işe goýberilen guýynyň düýp basyşyň grafikasynyň deňlemesi diýip hasap edip bolar (*2-nji surat*).

XV. GAZYŇ ÖÝJÜKLI SREDADA KADALAŞMADYK FILTRASIÝASY

15.1. Gazyň kadalaşmadyk filtrasiýasy. Leýbenzonyň deňlemesi

Ideal gazyň Darsiniň kanunyna laýyklykda kadalaşmadyk filtrasiýasynyň differensial deňlemesi aşakdaky görnüşde bolýar:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K}{2\mu m}\left[\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2}\right], \tag{XV.1}$$

ýa-da

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} = \frac{KP}{\mu m}\left[\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2}\right]. \tag{XV.2}$$

Bu deňleme, gönüçyzykly däl, paraboliki görnüşli deňleme bolup, maýyşgak düzgünde filtrasiýanyň differensial deňlemesinden tapawutlanyp, basyş P-niň ýerine P^2, hem-de χ ýerine $KP/\mu m$ ululygy ulanylýar.

Şu deňlemäniň takyk çözülişi diňe käbir hususy meseleler üçin alnandyr. Bu deňleme ýakynlaşdyrylan usul boýunça integrirlenýär. Has ýönekeý ýakynlaşdyrma I. A. Çarnyý tarapyndan tassyklanan. Ol üýtgeýän $KP/\mu m$ koeffisiýenti, ortalaşdyrylan $Kp_{ort}/\mu m$ koeffisiýente deňdir diýip alýar.

$$P_{ort} \approx P_{\min} + 0{,}7(P_{\max} - P_{\min}), \tag{XV.3}$$

bu ýerde $P_{\max}$ we $P_{\min}$ – gaz ýataklarynyň hasaplaýyş döwrüň çägindäki maksimal we minimal basyşy $P_{ort} = 0{,}722P_h$.

Şeýlelikde, deňleme gönüçyzykly differensial deňlemesine getirilýär. Onda gazyň kadalaşmadyk hereketini, maýyşgak suwuklygyň maýyşgak düzümindäki filtrasiýasynyň formulasy bilen hasaplap bolýar.

L. S. Leýbenzon tarapyndan, galereýada hemişelik basyş şertinde, zolak görnüşli ýapyk gatlakdaky gazyň akymy baradaky meselesiniň çözüwi alyndy. Mesele differensial deňligiň integrirlenmegine getirýär.

$$\frac{\partial P^2}{\partial t} = \frac{KP}{\mu m}\frac{\partial^2 P^2}{\partial X^2}. \qquad \text{(XV.4)}$$

Başlangyç we araçäkleýin şertlerinde

$P = P_n = const$ eger-de $t = 0$

$P_r = const$ haçanda $X = 0$

$$dP^2/dX = 0.$$

$X=l$ bolanda gaz gatlagynyň syzdyrmaýan araçägindäki şert bolýar. Mesele yzygiderli ýakynlaşdyrma usuly bilen çözülýär. Birinji ýakynlaşmada deňligiň sag tarapy hemişelik we $KP_n/\mu m$ deň diýip alynýar (XV.4) deňleme şu şertde ýylylyk geçirijilik deňlemesine öwrülip (XV.4) şertde onuň integraly aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

$$P^2(x,t) = P_G^2 + \frac{4}{\pi}(P_H^2 - P_G^2)\sum_{i=1,2,5,\dots}^{\infty}\frac{1}{i}e^{-wi^2\cdot t}\sin\frac{i\pi x}{2l}, \qquad \text{(XV.5)}$$

$$\omega = \frac{\pi^2 KP_H}{4m\mu|^2}.$$

Ikinji ýakynlaşmada $KP/\mu m$ koeffisiýentine girýän, diňe t wagta bagly bolan üýtgeýän basyş aşakdaky formula bilen aňladylýar.

$$P(t) = P_G + (P_H - P_G)e^{-wt/2} =$$

$$= P_H\left[\frac{P_G}{P_H} + \left[1 - \frac{P_G}{P_H}\right]e^{-wt/2}\right] = P_H\delta(t), \qquad \text{(XV.6)}$$

täze üýtgeýän ululyk girizsek,

$$\theta = \int_0^t \delta(t)dt = \frac{P_G}{P_H}t + \frac{2}{\omega}\left[1 - \frac{P_G}{P_H}\right](1 - l^{-wt/2}), \qquad (XV.7)$$

onda

$$\frac{\partial P^2}{\partial \theta} = \frac{KP_H}{\mu m}\frac{\partial^2 P^2}{\partial X^2}, \qquad (XV.8)$$

haçanda (XV.5) şertinde (XV.6) deňleme bilen berilse, onda üýtgeýän ululyk t hökman θ bilen çalşyrylmalydyr.

$$P^2(x,t) = P_G^2 + \frac{4}{\pi}(P_H^2 - P_G^2)\sum_{i=1,2,5,...}^{\infty}\frac{1}{i}e^{wi^2\theta}\sin\frac{i\pi x}{2l}. \qquad (XV.9)$$

Galereýanyň atmosfera basyşyna getirilen debiti şeýle görnüşde ýazmak bolar:

$$Q_{am} = \frac{BKh}{2\mu P_{am}}\left[\frac{\partial^2 P^2}{\partial X}\right]_{X=0} =$$

$$= \frac{BKh(P_H^2 - P_G^2)}{\mu P_{am} l}(e^{-w\theta} + e^{-9w\theta} + e^{-25we} + ...). \qquad (XV.10)$$

Gazyň kadalaşmadyk filtrasiýasy baradaky meseleleriň köpüsi material balans deňlemesini ulanyp, stasionar ýagdaýy yzygiderli çalşyrylýan usuly esasynda çözülýär. Eger gaz ýatagy ýapyk ulgam bolsa, onda atmosfera basyşa getirilen gazyň göwrümi şol ýatakdan bellibir t wagtda alnan gazyň $Q_{at}dt$ – bolup, şol bir wagta görä üýtgeýän gaz goruna deňdir. Eger öýjüklik göwrümi hemişelik bolsa, gaz idealydyr, syzyjylyk izotermikdir diýsek, şonda gaz zonasynyň üýtgeýşini $\Omega\frac{dP}{P_{at}}$ görnüşde ýazmak bolar. Şol aňlatmada dP, berlen dt wagt aralygynda gaz ýatagynyň ortalaşdyrylan göwrümleýin basyşynyň üýtgemegi:

$$Q_{at}dt = -\Omega\frac{dP}{P_{at}}. \qquad (XV.11)$$

Bu deňlik, gaz ýatagynyň boşamagyny aňladýan differensial deňleme. Kadalaşmadyk tekiz – radial filtrasiýasynda aralaşdyrylan

$\tilde{P}$, kontur basyşdan az-kem tapawutlanýar, şonuň üçin $\tilde{P}$-ny P_k bilen çalşyrylyp aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$Q_{at}dt = -\Omega \frac{dP_K}{P_{at}}. \qquad \text{(XV.12)}$$

Şu deňlik stasionar ýagdaýyny yzygiderli çalşyrylýan usul bilen bilelikde ulanylanda, gatlakdaky basyşyň ýaýraýşyny wagtyň geçmegi bilen islendik nokatdaky basyşyň üýtgemekligini, gazyň debitini wagtyň geçmegi bilen üýtgemesini hasaplap bolyar.

Şeýle şertler bolup:

a) $Q_{at} = const$;

b) $P_c = const$;

ç) $Q_{at} = CP_c$

$C = 2\pi r_c h\omega_{\max}$; $\omega_{\max}$ – filtrasiýa tizligi.

15.2. Gazyň guýa tarap akymynyň meselesini stasionar ýagdaýy yzygiderli çalşylýan usuly bilen kesgitlenişi

Bu usul aşakdaky çaklamalara esaslanýar:

1) haýsy hem bolsa bir wagtyň pursadynda filtrasion akymyň durnuklaşmadyk zolagy bellibir gutarnykly aralyga ýaýraýar.

2) şol zolakdaky filtrasion hereket stasionar hereket diýip hasaplanylýar.

3) şol zolagyň uzynlygy (ölçegi) material balans deňlemeden kesgitlenýär.

Gutarnykly radiusly r_s we $Q_{at} = const$ debitli guýa degişli meseläni işläliň.

Wagtyň islendik pursadynda durnuklaşmadyk zolak töwerekleýin radiusly $R(t)$ we onuň içinde basyşyň ýaýraýşy stasionar kanuna laýyk diýip hasap edýäris:

$$P(r,t) = \sqrt{P_k^2 - \frac{P_k^2 - P_S^2}{\ln\frac{R(t)}{r}} \ln\frac{R(t)}{r}}, \qquad r_S \le r \le r \le R. \quad \text{(XV.13)}$$

Durnuklaşmadyk zolakda stasionar filtrasiýa üçin debitiň formulasy

$$Q_{at} = \frac{\pi Kh(P_k^2 - P_S^2)}{\mu P_{at} \ln \frac{R(t)}{r_S}}. \tag{XV.14}$$

Deňleme (XV.14) ýazýarys:

$$\frac{P_k^2 - P_S^2}{\ln \frac{R(t)}{r_S}} = \frac{Q_{at} P_{at} \mu}{\pi Kh} \tag{XV.15}$$

we ony deňleme (XV.13)-de goýarys, onda

$$P(r,t) = \sqrt{P_k^2 - \frac{Q_{at} P_{at} \mu}{\pi Kh} \ln \frac{R(t)}{r}}. \tag{XV.16}$$

Durnuklaşmadyk zolagyň $R(t)$ radiusyny tapmak üçin material balans deňlemäni ýazýarys.

Şol zolagyň başlangyç gory (haçanda $P = P_k$)

$$M_O = \pi[R^2(t) - r_S^2] h m_O \rho_k = \pi[R^2(t) - r_S^2] h m_O \frac{\rho_{at}}{P_{at}} P_k. \tag{XV.17}$$

Şol zolagyň bellibir wagtdaky goruny kollektoryň orta agramlaýyn basyşyny girizip $\tilde{P}$ tapýarys:

$$M_t = \pi[R^2(t) - r_S^2] h m_O \widetilde{\rho} = \pi[R^2(t) - r_S^2] h m_O \frac{\rho_{at}}{P_{at}} \widetilde{P}, \tag{XV.18}$$

bu ýerde

$$\widetilde{P} = P_k - \frac{P_k^2 - P_S^2}{4P_k \ln \frac{R(t)}{r_S}}. \tag{XV.19}$$

$Q_{at} = const$ – hemişelik bolany sebäpli, t pursada çenli alnan gazyň massasy $\rho_{at} Q_{at} t$ bolar, onda

$$M_0 - M_t = \rho_{at} Q_{at} t.$$

Deňlemeler (17) we (18)-i ulanyp taparys:

$$\pi[R^2(t) - r_S^2]hm_O \frac{\rho_{at}}{P_{at}}(P_k - \widetilde{P}) = \rho_{at} Q_{at} t. \qquad \text{(XV.20)}$$

Soňky (XV.20) deňlemä orta agramlaýyn basyşyň (XV.19) we Q_{at} debitiň (XV.14) bahalaryny goýup taparys:

$$\pi[R^2(t) - r_S^2]hm_O \frac{\rho_{at}(P_k^2 - P_S^2)}{P_{at} 4P_k \ln\frac{R(t)}{r_S}} = \rho_{at} \frac{\pi Kh(P_k^2 - P_S^2)}{\mu P_{at} \ln\frac{R(t)}{r_S}} Q_{at} t,$$

bu ýerden

$$R^2(t) - r_S^2 = \frac{4KP_k}{\mu m_O} t = 4\overline{\chi} t,$$

ýa-da

$$R(t) = \sqrt{4\overline{\chi} t + r_S^2}, \qquad \text{(XV.21)}$$

haçanda $4\overline{\chi} t >> r_s^2$, onda

$$R(t) = 2\sqrt{\overline{\chi} t}. \qquad \text{(XV.22)}$$

Indi (XV.21), (XV.22) deňlemeleri ulanyp, (XV.16) deňlemeden gatlagyň islendik nokadyndaky islendik wagt pursadynda we guýynyň düýbünde basyşyň üýtgeýşini tapyp bileris:

$$P(r,t) = \sqrt{P_k^2 - \frac{Q_{at} P_{at} \mu}{\pi Kh} \ln\frac{\sqrt{4\overline{\chi} t + r_S^2}}{r}},$$

$$r_S \le r \le \sqrt{4\overline{\chi} t + r_S^2}, \qquad P = P_k, \qquad r > \sqrt{4\overline{\chi} t + r_S^2},$$

$$P_S(t) = \sqrt{P_k^2 - \frac{Q_{at} P_{at} \mu}{\pi Kh} \ln\frac{\sqrt{4\overline{\chi} t + r_S^2}}{r}}.$$

15.3. Gazyň kadalaşmadyk filtrasiýasy üçin superpozisiýa usuly

Superpozisiýa usuly bilen gaz känlerini özleşdirmegiň dürli meselelerini işläp bolýar. Şu usuly ulanyp gaz guýusynyň işi ýatyrlansoň onuň düýp basyşynyň galmagyny (ösüşini) häsiýetlendirýän egri çyzygy işläp kollektoryň parametrleri kesgitlenýär.

Gutarnyksyz gatlakda, uzak wagtyň T dowamynda $Q_{at} = const$ debitli gaz guýusy işledilip, wagtyň T pursadynda birden duruzylypdyr. Guýa gaz akmasy kesilipdir.

Superpozisiýa usulyny ulanyp wagtyň $t = T$ pursadynda Q_{at} mukdarly guýa goşmaça şol debitli suw basyjy guýy işläp başlapdyr diýip hasap edýäris.

Onda

$$P_k^2 - P_S^2 = \frac{Q_{at}P_{at}\mu}{2\pi Kh}\left[\ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}t}{r_S^2} - \ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}(t-T)}{r_S^2}\right]. \quad \text{(XV.23)}$$

Şol wagt hem aşakdaky deňleme berjaý bolýar:

$$P_k^2 - P_S^2 = \frac{Q_{at}P_{at}\mu}{2\pi Kh}\ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}T}{r_S^2}. \quad \text{(XV.24)}$$

Deňleme (XV.23)-den deňleme (XV.24)-i aýryp tapýarys:

$$P_S^2(t) - P_S^2(T) =$$

$$= \frac{Q_{at}P_{at}\mu}{2\pi Kh}\left[\ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}T}{r_S^2} - \ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}t}{r_S^2} + \ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}(t-T)}{r_S^2}\right] =$$

$$= \frac{Q_{at}P_{at}\mu}{2\pi Kh}\left(\ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}(t-T)}{r_S^2} - \ln\frac{t}{T}\right). \quad \text{(XV.25)}$$

Haçanda guýy işi ýatyrylanda öň uzak wagt T işlän bolsa we $t-T << T$, onda:

$$\ln\frac{t}{T} << \ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}(t-T)}{r_S^2},$$

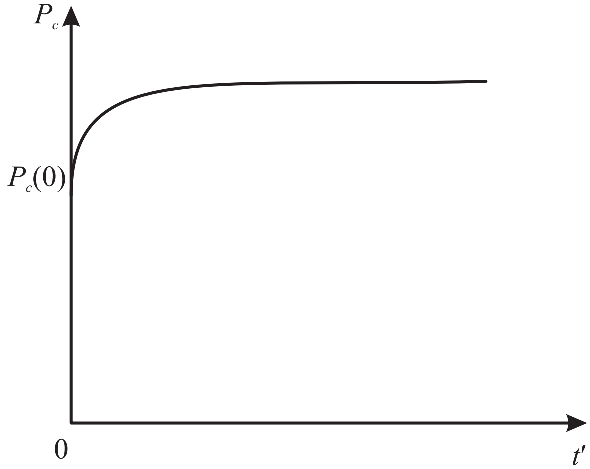
hem-de (XV.25) deňlemäniň $\ln\frac{t}{T}$ agzasyna seretmän geçip bilmeris: onda

$$P_S^2(t) - P_S^2(T) = \frac{Q_{at}P_{at}\mu}{2\pi Kh}\ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}(t-T)}{r_S^2}. \quad \text{(XV.26)}$$

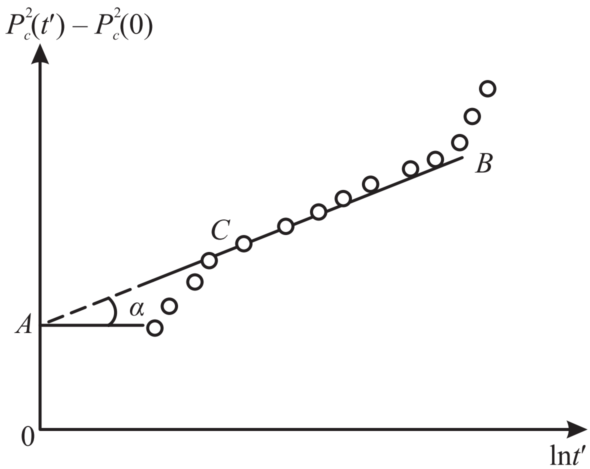
Guýynyň ýatyrylan wagtyny T, başlangyç wagt diýip hasap etsek $t' = t - T$, onda (XV.26) formula aşakdaky ýaly ýazylar:

$$P_S^2(t') - P_S^2(0) = \frac{Q_{at} P_{at} \mu}{2\pi K h} \ln \frac{2,25 \cdot \overline{\chi} t'}{r_S^2}. \qquad \text{(XV.27)}$$

Guýynyň düýp basyşynyň dikelmegi grafikde görkezilen (*1-nji surat*).



1-nji surat



2-nji surat

2-nji suratdaky grafikden görnüşi ýaly, $P_S^2(t') - P_S^2(0)$ bilen lnt' arabaglanyşygy çyzyklaýyn

$$P_S^2(t') - P_S^2(0) = \frac{Q_{at}P_{at}\mu}{2\pi Kh}\ln t' + \frac{Q_{at}P_{at}\mu}{2\pi Kh}\ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}}{r_S^2}. \quad \text{(XV.28)}$$

Onda

$$\Delta P_S = A + ilgt, \quad \text{(XV.29)}$$

bu ýerde

$$i = \frac{Q_{at}P_{at}\mu}{2\pi Kh} = tg\alpha. \quad \text{(XV.30)}$$

$$A = \frac{Q_{at}P_{at}\mu}{2\pi Kh}\ln\frac{2,25\cdot\overline{\chi}}{r_S^2}. \quad \text{(XV.31)}$$

Gatlagyň kollektor parametrlerini bilmek üçin olarda kadalaşmadyk düzgünde guýularda derňew geçirilýär. Dürli t' wagt pursatlarynda guýynyň düýp basyşy alynýar P_s. Alnan maglumatlaryň esasynda şu koordinatlarda grafik gurulýar: $P_S^2(t') - P_S^2(0)$ we lnt'(lgt'). Grafikdäki çyzygyň göni böleginiň ordinata oky bilen kesişýän ýeri AO böleginiň bahasyny berýär, onuň gorizontal oka bolan burçy α, tgα = i. Bu ululyklary we debiti Q_{at} berlen bahasyny ulanyp gatlagyň gidrogeçirijiligini taparys:

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{Q_{at}P_{at}}{2\pi tg\alpha} \quad \text{(XV.32)}$$

we

$$\frac{\overline{\chi}}{r_S^2} = \frac{1}{2,25}\cdot e^{OA/i}. \quad \text{(XV.33)}$$

XVI. JAÝRYKLY WE JAÝRYKLY-ÖÝJÜKLI SREDALARDA GAZLARYŇ WE SUWUKLYKLARYŇ HEREKETI

16.1. Jaýrykly we jaýrykly-öýjükli sredada filtrasiýanyň aýratynlyklary

Birnäçe gatlaklarda şeýle anomaliýalara duş gelip bolýar. Dag jynsynyň örän az geçirijiligine garamazdan, guýy buraw edilýärkä laý ergininiň intensiw siňmesi bolup geçýär: kadalaşan düzgünde işleýän guýulardan, dag jynsynyň örän az geçirijiligine garamazdan, ýokary debit alynýar. Şular ýaly hadysalar, gatlakda birnäçe özara baglanyşykly jaýryklaryň bardygyny görkezýär. Şol gatlakdaky jaýryklar gazyň hem-de suwuklyklaryň akymynyň esasy ýaly ýa-da laý ergininiň siňmesiniň sebäbi bolup durýar. Şular ýaly gatlaklara jaýrykly gatlaklar diýilýär.

Guýularda geçirilýän derňew işleriniň maglumatlaryna göra hem-de kerniň we şlifiň barlag maglumatlary esasynda jaýrykly dag jynsyň çylşyrymly gurluş ulgamlarynyň bardygyny subut edýär, hem-de şol ýerdäki suwuklygyň we gazyň hereketi, öýjükli sredadaky hereketi bilen deňeşdirilende birnäçe aýratynlyklary bilen tapawutlanýar. Jaýrykly jynsda makro we mikro jaýryklar, ownuk we iri kowekler, boşluklar bar. Jynsyň özi – matrisa jaýryklaryň arasyndaky giňişlik bolup we absolýut geçirmeýän bolup bilýär, ýa-da adaty öýjükli sreda şekilinde bolmagy mümkin. Makro jaýrygynyň açylmagy 1 *mm* bolup, aýratyn ýagdaýlarda uly bolmagy hem mümkin, mikro jaýryklar bolsa 1–100 *mkm* çenli bolýar. Şoňa görä-de jaýrykly jynsda suwuklygyň hereketine garşylyk ýeterlik derejede uly bolýar, sebäbi makro jaýryklar uly aralygy tutmaýarlar we köp ýagdaýlarda öz aralarynda mikro jaýryklar bilen birleşýärler (ýagny uly garşylygy döredýärler).

Jaýrykly jynslarda suwuklyklaryň we gazlaryň süzülmeginiň (filtrasiýasynyň) aýratynlygyna düşünmek üçin jynsyň iki modeline seredilýär – arassa jaýrykly we öýjükli-jaýrykly (*1-nji surat*). Arassa jaýrykly jynsda, jynsyň bloklary jaýryklaryň arasynda ýerleşýär we onuň geçirijiligi $k = 0$ hasaplanylýar. Suwuklyklaryň we gazlaryň hereketi diňe jaýryklar boýunça geçýär. Şeýle jynslara slanslar, dolomitler, mergeller we birnäçe hekler degişlidir. Jaýrykly öýjükli sreda bolanda biri – birinden ösen jaýryk ulgamly öýjükli bloklaryň toplumyndan durýar. Suwuklyk ýa-da gaz bloklary we jaýryklary doldurýar. Jaýryklaryň kese ölçegleri, bloklardaky öýjükleriň ölçeglerinden has uly bolýar, şonuň üçin jaýryklar ulgamlaryň geçirijiligi K_1 bloklardaky öýjükler ulgamlaryň geçirijiliginden – K_2 köp uly bolýar. Şol bir wagtda jaýryklar bloklaryň öýjüklerinden az göwrüm tutýar. Şonuň üçin jaýryklyk koeffisiýenti m_1, bloklaryň öýjüklik koeffisiýentinden mese-mälim az bolýar.

Diňe jaýrykly jynslaryň häsiýetlerine seredeliň. Jaýryk, bu iki ölçegi üçünji ölçeginden birnäçe esse uly bolan darajyk yşdyr. Jaýryklyk koeffisiýenti adatda %-iň bir bölüminden durýar (şol bir wagtda jynsyň öýjüklik koeffisiýenti 10–20% bolýar). Jaýryklyk koeffisiýenti m_1, edil geçirijilik koeffisiýenti K_1 ýaly, jaýryklaryň açylyşy we ýygylygy bilen kesgitlenýär. Jaýryklaryň ýygylygy G jaýryklaryň sanynyň normal geçirilen L uzynlygynyň gatnaşygyna deň. Düşnükli bolar ýaly, jaýrykly sredanyň modeli diýip açylmasy «δ» bolan özara parallel jaýryklary alalyň. Jaýryklaryň ýygylygy $G = n/h$, jaýryklyk koeffisiýenti bolsa

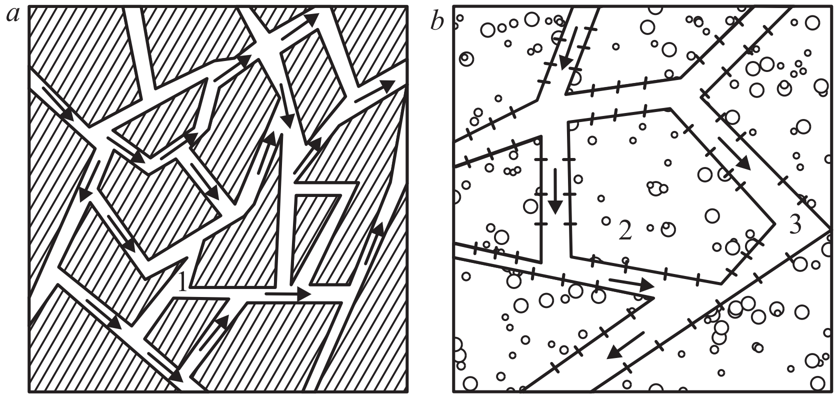
$$m_1 = \mathrm{I}\delta/(ach) = G\delta. \qquad \text{(XVI.1)}$$

Eger gatlakda iki özara perpendikulýar ulgamly ýygylygy we açylyşy deň jaýryk bar bolsa, onda $m_1 = 2G\delta$, eger-de üç ulgamly bolanda $m_1 = 3G\delta$.

Umumy ýagdaýlarda

$$m_1 = \theta G\delta, \qquad \text{(XVI.2)}$$

bu ýerde θ – jynsda jaýryklaryň geometrik ulgamyna bagly bolan ölçegsiz koeffisiýenti.



1-nji surat

Gazlaryň we suwuklyklaryň jaýrykdaky hereketine, arasy «δ» bolan darajyk yşda geçýän hereket ýaly göz öňüne getirmeli. Şeýle hereket bolanda yşlardaky suwuklygyň ortaça tizligi üçin Bussineskanyň formulasy ulanylýar:

$$\vartheta = -\frac{\delta^2}{12\mu}\frac{dP}{dX}, \qquad \text{(XVI.3)}$$

bu ýerde μ – dinamiki şepbeşikligiň koeffisiýenti, dP/dX – basyş gradiýenti.

Süzülmek tizligine geçende

$$\omega = m_1\vartheta,$$

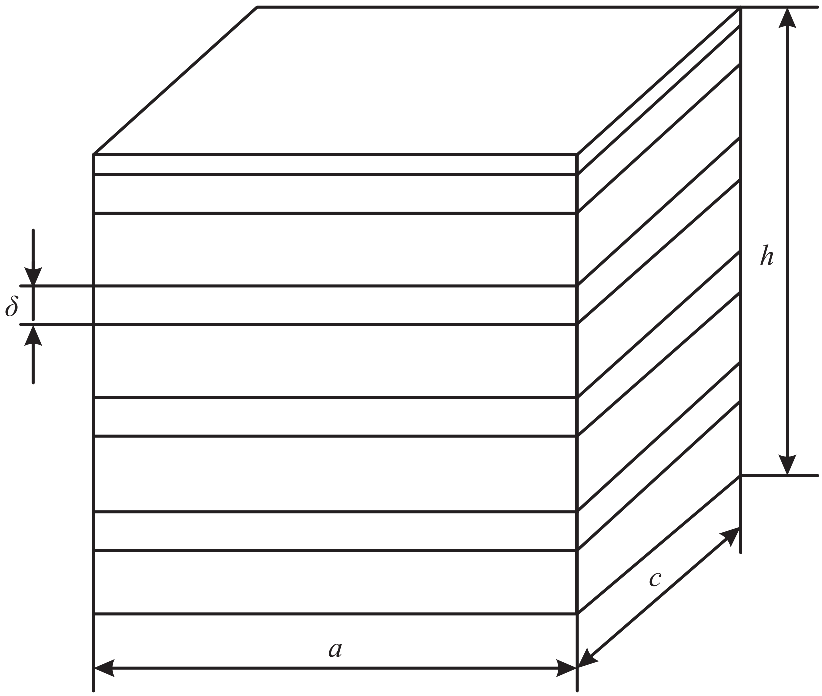
$$\omega = -\frac{m_1\delta^2}{12\mu}\frac{dP}{dX}. \qquad \text{(XVI.4)}$$

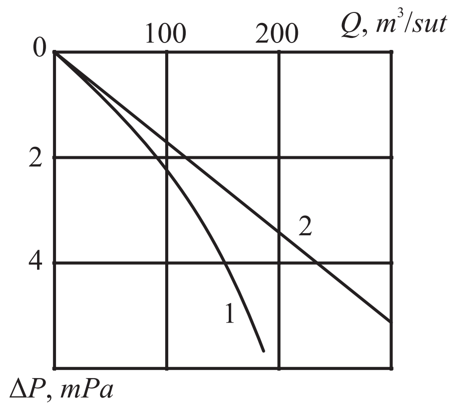
Şu formulany Darsiniň kanuny bilen deňeşdirip, şol ýokarda berlen formulany ulanyp, jaýrykly jynsyň geçirijilik koeffisiýentini tapýarys:

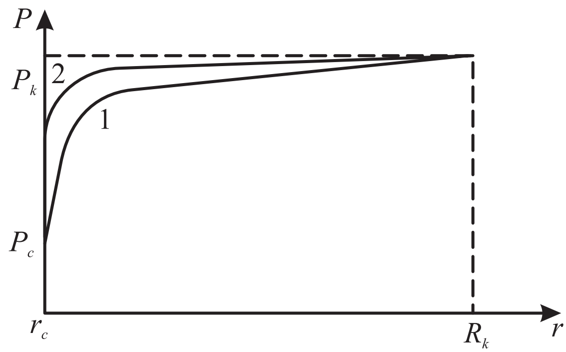
$$K_1 = m_1\delta^2/12 = \theta G\delta^2/12. \qquad \text{(XVI.5)}$$

Jaýrykly jynsyň geçirijiligini, öýjükli sreda bilen deňeşdireniňde, has köp derejede gatlaklaryň basyşyna bagly bolup durýar. Soňky formuladan $K_1(P)$ baglylygy almak bolýar. Ýagny dag basyşy hemişelik basyş diýip hasaplap bolýar, sebäbi ol jaýryklardaky suwuklygyň basyşy we jynslaryň skeletindäki dartgynlyk bilen deňagramlaşýar.

Gatlakdaky basyşyň peselmegi bilen jynsyň skeletine bolan agram artýar we jaýryklaryň «δ» açylyşy azalýar (basyşyň ýokarlanmagy bilen jaýryklaryň açylyşy artýar). Eger deformasiýa jaýrykly gatlakda maýyşgak we ululygy boýunça kiçi bolsa, onda jaýrygyň «δ» açylyşy basyş bilen çyzykly bagly bolýar:







2-nji surat

$$\delta = \delta_o[1 - \beta(P_o - P)] \qquad \text{(XVI.6)}$$

bu ýerde β çatlaryň geometrik ýerleşişine we maýyşgaklygyna garaşly, jaýrykly sredanyň parametri.

Geçirijilik koeffisiýentini K_1 basyşa baglylykda ýokarda berlen formulalardan alyp ýazarys:

$$K_1 = K_1^O[1 - \beta(P_O - P)]^3, \qquad \text{(XVI.7)}$$

bu ýerde $K_1^O - P_O$ basyşda jaýrykly jynsyň geçirijilik koeffisiýenti.

Öň görkezilişi ýaly, geçirijiligiň basyşa eksponensial baglylygy birnäçe eksperimentler arkaly gowy tassyklanan

$$K_1 = K_1^O e^{-\alpha(P_O - P)}. \qquad \text{(XVI.8)}$$

Eger basyş az üýtgeýän bolsa, onda $K_1(P)$ baglylygy çyzykly hasap edilýär.

$$K_1 = K_1^O[1 - \alpha(P_O - P)], \qquad \text{(XVI.9)}$$

bu ýerde $\alpha = 3\beta$.

Jaýrykly öýjükli gatlakda kadalaşan filtrasiýa seredilende jaýryklaryň geçirijilik koeffisiýenti K_1 basyşa bagly we ýokarda berlen deňlikler bilen kesgitlenýär, ýöne öýjükli bloklarda K_2 geçirijilik koeffisiýenti basyşa bagly däl diýip hemişelik kabul edilýär. Jaýrykly-öýjükli sredada kadalaşan filtrasiýa akymlaryň gatnaşyklary, jaýrykdaky akymlar we blokdaky öýjükler içindäki akymlaryň jemine deň diýip alynýar.

Jaýrykly gatlaklarda jaýryklardaky debitler, köplenç, beýik bolýar we inersion güýçler ýüze çykýar, şol sebäpli filtrasiýa Darsiniň kanunyna boýun egmeýär. Jaýrykly öýjükli sredadaky filtrasiýa üýtgeşiklikleri kadalaşmadyk proseslerde duş gelinýär.

Jaýryklaryň we öýjükleriň ulgamy dürli masştably iki sreda diýip göz öňüne getirmeli. Öýjükleriň ortaça ölçegi 1–100 *mkm* çenli bolýar, jaýryklaryň uzynlygy bolsa birnäçe santimetrden onlarça metre deň bolýar. Bloklaryň öýjüklik koeffisiýenti m_2 1–2 tertip çataçmak koeffisiýentinden m_1 beýik bolany üçin suwuklygyň uly göwrümi öýjüklerde ýerleşýär. Hemişe bolşy ýaly, öýjükli bloklaryň geçirijiligi az bolany sebäpli ($K_2 << K_1$), suwuklyk şolardan jaýryga geçip, guýa tarap jaýryklardan hereket edýär, sebäbi jaýrygyň geçirijiligi öýjükli bloklaryndan beýik. Bu prosese jikme-jik seredip geçeliň. Goý, guýynyň düýbündäki basyşyň birden üýtgemesi bolup geçsin. Eger-de bloklary flýuid geçirmeýär diýip hasap etsek, onda gatlakda maýyşgak düzgünine laýyk gelýän teoriýany ulanyp bolýar, ýöne jaýrykly ulgamyň häsiýetnamasy esasynda kesgitlenen pýezogeçirijilik koeffisiýenti

$$œ = K_1/[(\beta_S m_1 + \beta_c)\mu], \qquad \text{(XVI.10)}$$

örän uly bolmagy mümkin, sebäbi K_1 beýik bolup ýöne m_1 az bolýar. Diýmek, basyşyň jaýryklarda üýtgeýiş prosesi uly tizlik bilen geçýär, we jaýryklarda az wagtyň içinde basyş täze derejesinde kadalaşýar. Bloklaryň geçirijiligi pes bolany sebäpli olardan suwuklyk örän haýal jaýryklara çykýar we bloklarda basyş öz başlangyç bahasyny uzak wagtlap saklaýar. Şeýlelikde, blokda we onuň daşyndaky sredada ýerleşýän suwuklyklaryň arasynda basyşyň tapawudy döreýär. Şol sebäpli blokdan jaýryklara suwuklygyň geçmegi ýuwaş –ýuwaşdan basyşlaryň (blokdaky we gatlakdaky) deňleşmegine getirýär. Blogyň geçirijiligi K_2 näçe az bolsa, onuň ölçegleri uly, öýjükligi m_2 bilen suwuklygyň β_S we bloklaryň β_c gysylmak koeffisiýentleri näçe uly bolsa, şonça-da bu hadysanyň dowamlylygy uzak bolýar.

Şeýlelik bilen, jaýryklarda we bloklardaky hereketiň häsiýetlendirilişi dürli-dürli bolýar. Jaýryklardaky basyşa P_1 seredeniňde, P_2 basyş uly bolýar hem-de jaýryklardakydan blokdaky filtrasiýanyň tizligi mese-mälim kiçi bolýar. Şonuň üçin hem, jaýrykly öýjükli sreda masştaby dürli bolan öýjükli iki sredanyň birleşmesi ýaly seredilýär:

1) birinji sreda – ulaldylan sreda.

Bu sredada gazlar we suwuklyklar üçin bloklaryň geçirijilikleri nola deň we olaryň hereketi diňe jaýryklarda geçýär diýip hasaplanýar. Bu sredada basyş P_1-e – deňdir, filtrasiýanyň tizligi bolsa ω_1-e deňdir.

2) ikinji sreda – öýjükli bloklaryň ulgamy.

Bu sredada gazlaryň we suwuklyklaryň hereketi öýjükli bloklarda geçip, onuň tizligi ω_2, basyşy bolsa P_2-ä ýetýär. Bu ýerde P_1 – jaýryklardaky ortaça basyş, P_2 bloklardaky ortaça basyş, ω_1 hem-de ω_2 – şol ýerdäki süzülmek (filtrasiýa) tizlikleri.

Jaýrykly-öýjükli sredada kadalaşmadyk filtrasiýanyň aýratynlygy – ol iki sredanyň arasynda bolup geçýän suwuklyklaryň intensiw çalşygy. Suwuklyklar, basyşy P_2 ýokary bolan bloklardan basyşy – P_1 pes bolan jaýryklara gönükdirilýär. Suwuklyklaryň çalşygy wagtyň dowamynda basyşyň haýal üýtgemegi bilen geçýär, şonun üçin bu hadysa kwazistasionar diýip hasaplasak bolýar, ýagny wagta bagly däl. Jynsyň göwrüm birliginde bloklardan jaýryklara wagt birliginde geçýän gowşak gysylýan suwuklygyň massasy, onuň ρ_o dykyzlygyna we P_1 hem-de P_2 basyşyň tapawudyna proporsional we şepbeşiklige μ ters proporsional, ýagny

$$q = \alpha_0 \frac{\rho_0}{\mu}(P_2 - P_1), \qquad \text{(XVI.11)}$$

bu ýerde α_o – blogyň geometrik häsiýetine bagly ölçegsiz koeffisiýenti

$$\alpha_o = \bar{\alpha} K_2 / l^2 \qquad \text{(XVI.12)}$$

bu ýerde K_2 – blogyň geçirijiligi, l – blogyň ortaça ölçegi, α – blogyň formasyny häsiýetlendirýän ölçegsiz ululyklar.

Eger dykyzlyk uly möçberde basyşa bagly bolsa, onda ýokarda ýazylan gatnaşyk, şol (şeýle) ýagdaý üçin anyklanan bolmaly. Meselem, ideal gazyň filtrasiýasy wagtynda blokdan jaýryga akymyň intensiwligi şeýle görnüşde görkezilýär:

$$q = \alpha_0 \frac{\rho_O (P_2^2 - P^2)}{2\mu P_0}, \qquad \text{(XVI.13)}$$

bu ýerde P_O – dykyzlyga bagly, fiksirlenen (bellenilen) basyş.

16.2. JAÝRYKLY-ÖÝJÜKLI WE JAÝRYKLY SREDADA GAZLARYŇ WE SUWUKLYKLARYŇ HEREKETINIŇ DIFFERENSIAL DEŇLEMESI

Deformirlenýän öýjükli sredada gazlaryň we suwuklyklaryň hereketiniň differensial deňlemesini çykarmak üçin, ýagny her nokatda iki basyş bar (P_1 – jaýrykly sistemada, P_2 – öýjükli bloklarda) we filtrasiýanyň iki tizligi – ω_1 we ω_2 bar diýip hasap edýäris. Sredanyň arasyndaky akym bolsa ýokarda görkezilen formulalar bilen kesgitlenýär. Differensial deňlemesi düzülende üzülmesiz akym üçin iki deňleme ýazylýar – biri jaýryklardaky filtrasiýa üçin (sreda – 1), beýlekisi öýjükli blokdaky filtrasiýa üçin (sreda – 2). Jaýryklardaky suwuklygyň balans deňlemesi, üzülmesiz akym üçin ýazylan deňlemeden diňe sag böleginde goşmaça q çleniň barlygy bilen tapawutlanýar. Q – jynsyň göwrüm birliginde, bloklardan jaýryklara wagt birligine geçýän suwuklygyň (gazyň) massasy:

$$-\left[\frac{\partial(\rho\omega_{1x})}{\partial x}+\frac{\partial(\rho\omega_{1y})}{\partial y}+\frac{\partial(\rho\omega_{1z})}{\partial z}\right]=\frac{\partial(\rho\omega_1)}{\partial t}-q \qquad \text{(XVI.14)}$$

bu ýerde ρ – suwuklygyň ýa-da gazyň P_1 basyşda dykyzlygy.

Öýjükli bloklarda bolsa filtrasiýa üçin deňleme şu görnüşi kabul edýär:

$$-\left[\frac{\partial(\rho\omega_{2x})}{\partial x}+\frac{\partial(\rho\omega_{2y})}{\partial y}+\frac{\partial(\rho\omega_{2z})}{\partial z}\right]=\frac{\partial(\rho\omega_2)}{\partial t}+q. \qquad \text{(XVI.15)}$$

Diňe jaýrykly gatlak üçin $q = 0$ we ýokarda berlen iki deňlemäniň diňe birinjisi galýar, sebäbi bloklarda suwuklyk bolmaýar.

Filtrasiýa Darsiniň kanunyna boýun egýär diýip hasaplasak, onda gatlaklaryň (jaýryklaryň) we öýjükli bloklaryň ulgamyndaky hereketiň differensial deňlemesini ýazyp bilýäris:

$$\omega_{1x} = -\frac{K_1}{\mu}\frac{\partial P_1}{\partial x}; \qquad \omega_{1y} = -\frac{K_1}{\mu}\frac{\partial P_1}{\partial y}; \qquad \omega_{1z} = -\frac{K_1}{\mu}\frac{\partial P_1}{\partial z};$$

$$\omega_{2x} = -\frac{K_2}{\mu}\frac{\partial P_2}{\partial x}; \qquad \omega_{2y} = -\frac{K_2}{\mu}\frac{\partial P_2}{\partial y}; \qquad \omega_{2z} = -\frac{K_2}{\mu}\frac{\partial P_2}{\partial z}. \quad \text{(XVI.16)}$$

(XVI.16) hem-de maýyşgak suwuklyk üçin (XVI.15) formula hem-de (XVI.14)-(XVI.15) deňlemelere goýsak, birmeňzeş flýuidiň jaýrykly öýjükli sredada kadalaşmadyk filtrasiýasy üçin deňleme sistemasyny alýarys:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\rho(p_1)K_1(p_1)}{\mu}\frac{\partial P_1}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\rho(p_1)K_1(p_1)}{\mu}\frac{\partial P_1}{\partial y}\right] +$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{\rho(p_1)K_1(p_1)}{\mu}\frac{\partial P_1}{\partial z}\right] =$$

$$= \frac{\partial}{\partial t}\left[\rho(p_1)m_1(p_1) - \alpha_0\frac{\rho_0}{\mu}[f(P_2) - f(P_1)]\right].$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\rho(p_2)K_2(p_2)}{\mu}\frac{\partial P_2}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\rho(p_2)K_2(p_2)}{\mu}\frac{\partial P_2}{\partial x}\right] +$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{\rho(p_2)K_2(p_2)}{\mu}\frac{\partial P_2}{\partial z}\right] =$$

$$= \frac{\partial}{\partial t}\left[\rho(p_2)m_2(p_2) + \alpha_0\frac{\rho_0}{\mu}[f(P_2) - f(P_1)]\right]. \qquad \text{(XVI.17)}$$

$f(P) = P$ maýyşgak suwuklyk üçin; $f(P) = P^2/2P_o$ ideal gaz üçin.

16.3. Jaýrykly we jaýrykly-öýjükli gatlakda suwuklygyň we gazyň bir ölçegli kadalaşan filtrasiýasy

Deformirlenýän jaýrykly gatlakdaky gazyň we suwuklygyň kadalaşan filtrasiýasyna seredeliň. Bu ýerde gatlagyň geçirijilik koeffisiýentiniň basyşa baglylygyny göz öňünde tutalyň. Bu ýagdaýda (XVI.17) deňligiň sag tarapy nola deň bolýar we jaýrykdaky basyşyň differensial deňlemesi şu görnüşe eýe bolýar:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\rho(p)K_1(p)}{\mu}\frac{\partial P}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\rho(p)K_1(p)}{\mu}\frac{\partial P}{\partial y}\right]+$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{\rho(p)K_1(p)}{\mu}\frac{\partial P}{\partial z}\right]=0. \qquad \text{(XVI.18)}$$

Leýbenzonyň funksiýasyny girizeliň:

$$L=\int\frac{\rho(p)K_1(p)}{\mu}dP+C \qquad \text{(XVI.19)}$$

bu funksiýa Laplasyň deňlemesini kanagatlandyrýar.

$$\frac{\partial^2 L}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 L}{\partial Y^2}+\frac{\partial^2 L}{\partial Z^2}=0. \qquad \text{(XVI.20)}$$

Geçirijiligi hemişelik bolan sredada, gysylmaýan suwuklygyň kadalaşan filtrasiýasy döwründe, başda görkezilişi ýaly, Laplasyň deňlemesine ylaýyk gelýär. Şony göz öňünde tutsak, onda deformirlenmeýän öýjükli sredada suwuklygyň kadalaşan filtrasiýasy bilen deformirlenýän jaýrykly sredada suwuklygyň we gazyň filtrasiýasynyň arasynda analogiýa geçirmek mümkin. Şeýlelikde, başdaky bölümlerde gysylmaýan suwuklyklar üçin çykarylan formulalar, deformirlenýän gatlakdaky akymlar üçin, basyşy – P, Leýbenzonyň funksiýasyna – L çalşyp, şol bir çäklendirilen şertlerde, ulanmak mümkin.

Bu ölçegli filtrasiýa üçin massalaýyn debit differensial deňlemeden kesgitlenýär:

$$Q_m=-\frac{\rho(p)K_1(p)}{\mu}\frac{dP}{dS}F(S)=-\frac{dL}{dS}F(S). \qquad \text{(XVI.21)}$$

Gysylmaýan suwuklygyň filtrasiýasyna seredeliň, haçanda ($\mu=const$; $\rho=const$). Geçirijiligiň basyşa eksponensial baglylygyny göz öňünde tutsak, onda Leýbenzonyň funksiýasyny aşakdaky görnüşde ýazyp bolar:

$$L=\int\frac{\rho}{\mu}K_1^0\frac{e^{-\alpha(P_0-P)}}{\alpha}dP+C=\frac{\rho K_1^0}{\mu}\frac{e^{-\alpha(P_0-P)}}{\alpha}+C. \qquad \text{(XVI.22)}$$

Suwuklygyň tegelek görnüşli gatlakda tekiz – radial filtrasiýasy geçende, guýynyň debiti Dýupýuiniň formulasy esasynda kesgitlenýär. Bu formulada basyş P_k we P_c Leýbenzonyň funksiýasynyň bahasy bilen çalşyrmaly

$$L_K = \frac{\rho K_1^0}{\mu}\frac{e^{-\alpha(P_0 - P_K)}}{\alpha} + C,$$

$$L_S = \frac{\rho K_1^0}{\mu}\frac{e^{-\alpha(P_0 - P_c)}}{\alpha} + C. \qquad \text{(XVI.23)}$$

Eger $P_0 = P_k$ onda

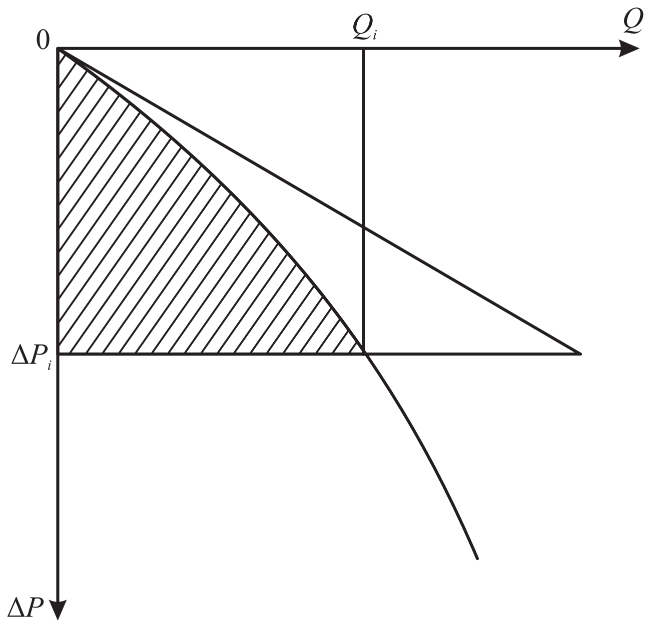
$$Q_m = \frac{2\pi h \rho K_1^0 [1 - e^{-\alpha(P_K - P_c)}]}{\mu\alpha \ln\frac{R_K}{r_c}}, \qquad \text{(XVI.24)}$$

göwrümleýin debit bolsa şu formula bilen kesgitlenýär

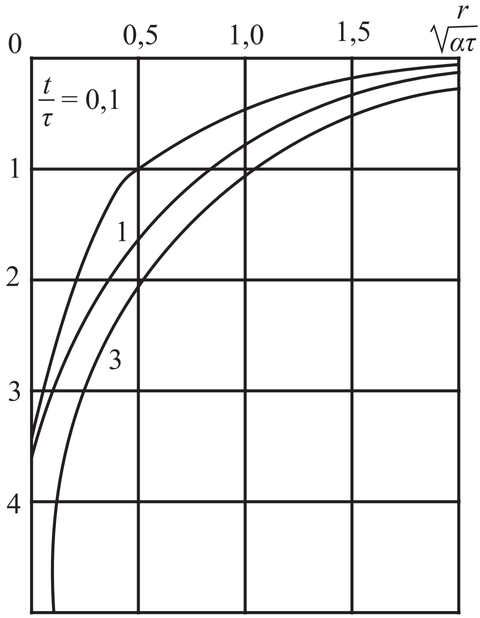
$$Q_m = \frac{2\pi h K_1^0 [1 - e^{-\alpha(P_K - P_c)}]}{\mu\alpha \ln\frac{R_K}{r_c}}. \qquad \text{(XVI.25)}$$

Şu formula laýyklykda $Q = f(\Delta P)$ gurlan indikator diagramma egri çyzykly suratlandyrylýar (*3-nji surat*).

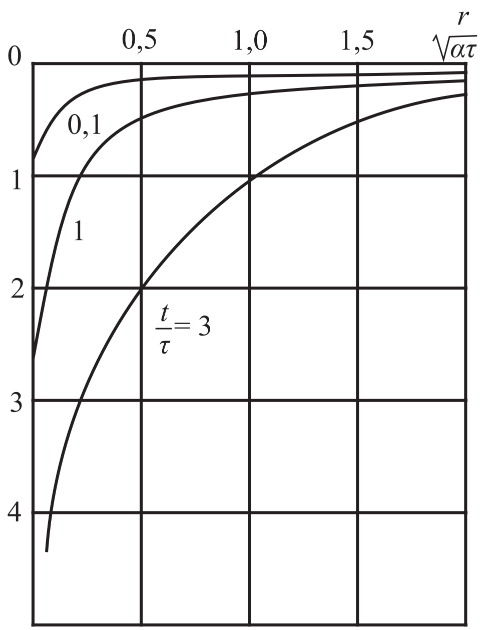
Gatlakda basyşyň ýaýraýşy bolsa aşakdaky formula bilen kesgitlenýär:



3-nji surat



0
0,5
1,0
1,5
$\frac{r}{\sqrt{\alpha\tau}}$
$\frac{t}{\tau} = 0,1$
1
1
2
3
3
4



0
0,5
1,0
1,5
$\frac{r}{\sqrt{\alpha\tau}}$
0,1
1
1
2
$\frac{t}{\tau} = 3$
3
4

4-nji surat

$$P = P_K + \frac{1}{\alpha}\ln\left[1 - \frac{1 - e^{-\alpha(P_K - P_c)}}{\ln\frac{R_K}{r_c}}\ln\frac{R_K}{r}\right]. \qquad \text{(XVI.26)}$$

Deformirlenýän we deformirlenmeýän gatlaklarda basyşyň egri ýaýraýşyny häsiýetlendirýän çyzyklary deňeşdirenimizde (*4-nji surat*), olaryň tapawudy ýüze çykýar. Deformirlenýän jaýrykly gatlakda, deformirlenmeýän gatlaga seredeniňde, gatlakdaky basyşyň peselmesi bilen jaýryklaň göwrümi kiçelýär, şol sebäpli garşylyk köpelýär we basyş birden pese düşmek bilen bolýar.

Jaýrykly gatlaklaryň α we K_1^0 – geçirijilik koeffisiýentleriniň kesgitlenişi tejribede uly ähmiýete eýe. Bu koeffisiýentleri indikator diagrammalaryň üstünden tapyp bolýar (*3-nji surat*). Indikator diagrammada iki meýdan kesgitlenýär:

1. $f_1 = \int_0^{\Delta P_i} Q d(\Delta P_i)$ – bu egri çyzykda $Q(\Delta P)$ we ordinat okuň arasyny tutýan meýdan (ol ştrihlenen).

2. $f_2 = Q_i \Delta P_i$ – indikator çyzykda bellibir nokat üçin gönüburçlugyň tutýan meýdany. Bu iki meýdanyň gatnaşygy $Z_{teor} = f_1/f_2$ formulany ulanmak arkaly teoretik hasaplanýar. Bu ýerde Z ölçegsiz bir ululyk bolup $\alpha\Delta P$ garaşly bolýar:

$$Z = f_1/f_2 = \frac{1}{1 - e^{\alpha\Delta P_i}} - \frac{1}{\alpha\Delta P_i}. \qquad \text{(XVI.27)}$$

$\alpha\Delta P$-nyň birnäçe bahalary üçin Z-nyň bahasy ýokarda berlen formula boýunça hasaplanýar we tablisa ýerleşdirilýär. Başga bir tarapdan $Z = f_1/f_2$ indikator diagrammadaky birnäçe nokatlar üçin meýdanlaryň gatnaşygy kesgitlenýär we tapylan Z – bahasyna laýyklykda $\alpha\Delta P_i$ tapylýar. ΔP_i-nyň belli bolany üçin α-ny hem tapmak mümkin. Birnäçe ΔP_i üçin α bahasy tapylyp onuň ortaça bahasyny alýarlar. α belli bolansoň, debitiň formulasyndan gidrogeçirijilik koeffisiýentini $K_1^0 h/\mu$, soňra bolsa jaýrykly gatlaklaryň geçirijilik koeffisiýentini – K_1^0 tapýarys.

Depressiýanyň artmagy bilen indikator çyzyklarynyň egrelmegi, diňe geçirijiligiň basyşa bolan baglylygyndaky däl-de başga hem sebäplere görä (filtrasiýa Darsiniň kanunyndan çykýar, gatlakda başlangyç gradiýentiň barlygy, gatlagyň işleýän galyňlygynyň üýtgemegi we ş.m.) bolmagy mümkin.

Jaýrykly öýjükli gatlakda, guýynyň debiti jaýryklardan akyp gelýän we öýjükli bloklardan barýan suwuklygyň debitinden durýar. Mysal üçin, geçirijiligiň basyşa eksponensial baglylygy amala aşýan ýagdaýynda, guýynyň jemleýji debitiniň formulasy aşakdaky görnüşde bolýar:

$$Q = \frac{2\pi k_2 h(P_K - P_c)}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}} + \frac{2\pi k_1^0 h[(1 - e^{-\alpha(P_K - P_c)})]}{\mu\alpha \ln \frac{R_K}{r_c}}, \qquad \text{(XVI.28)}$$

bu ýerde K_2 – const deregine kabul edilýär. Ýöne, köplenç, öýjükli bloklaryň geçirijiligi jaýryklaryňkydan az bolýar, şonuň üçin esasy bölegini jaýryklardan gelýän suwuklyk tutýar. Şol sebäpli formulada birinji goşulyjyny hasap etmesizligi, debit hasaplananda uly bir ýalňyşlyk bermeýär.

Ideal gazyň deformirlenýän jaýrykly gatlakda durnukly izotermiki filtrasiýasyna seredip geçsek, ýagny şonda geçirijilik koeffisiýentiniň basyşa görä baglylygy gönüçyzyklydyr. Bu baglanyşyk gaz üçin ýerlikli diýip kabul edilýär, sebäbi gazyň filtrasiýasy geçende basyşyň üýtgemegi az bolýar. Bu ýagdaýda Leýbenzonyň funksiýasy üçin formulany aşakdaky görnüşde ýazyp bolar (bu ýerde $P_0 = P_k$)

$$L = \int \frac{\rho(p)K_1(p)}{\mu} dp + C =$$

$$= \int \frac{\rho_{am} P}{P_{am}} \frac{K_1^0[1 - \alpha(P_K - P)]}{\mu} dp + C =$$

$$= \frac{\rho_{am} K_1^0}{P_{am}\mu}\left[(1 - \alpha P_K)\int P dp + \alpha \int P^2 dp\right] + C =$$

$$= \frac{\rho_{am} K_1^0}{P_{am\mu}\mu}\left[(1 - \alpha P_K)\frac{P^2}{2} + \alpha\frac{P^3}{3}\right] + C. \qquad \text{(XVI.29)}$$

Töwerekleýin gatlakda tekiz-radial filtrasiýa seredenimizde, gazyň massalaýyn debitini alyp bolar, eger-de Dýupýuiniň formulasyna ýokarda görkezilen Leýbenzonyň funksiýasyny girizip hem-de $P = P_k$ we $P = P_c$ diýip alsak, onda:

$$Q_m = \frac{2\pi k_1^0 h\rho_{at}\left\{\left[(1-\alpha P_K)\frac{P_K^2}{2} + \alpha\frac{P_K^3}{3}\right] - \left[(1-\alpha P_K)\frac{P_c^2}{2} + \alpha\frac{P_c^3}{3}\right]\right\}}{P_{am}\mu\ln\left(\frac{R_K}{r_c}\right)}. \tag{XVI.30}$$

Atmosfera basyşa göwrümleýin getirme debit bolsa:

$$Q_m = \frac{\pi k_1 h(P_K^2 - P_c^2)}{P_{am}\mu\ln\left(\frac{R_K}{r_c}\right)}\left[1 - \frac{\alpha}{3}P_K + \frac{2}{3}\alpha\frac{P_c^2}{P_K + P_c}\right]. \tag{XVI.31}$$

Bu ýerde ýaýyň öňündäki formula maýyşgak däl sredada gazyň debitini aňladýar we töwerekleýin gazyň akymyny α parametriň täsirine baha berýär.

Eger maýyşgak däl sredada gazyň debitini Q_* arkaly aňlatsak (ýagny $\alpha = 0$), onda gysylýan sredadaky gazyň debitiniň hemişelik geçirijili sredadaky debitden gyşarmasyny hasaplap bolýar:

$$\frac{Q_{am}}{Q^*} = 1 - \frac{\alpha}{3}P_K + \frac{2}{3}\alpha\frac{P_c^2}{P_K + P_c}. \tag{XVI.32}$$

Eger-de, mysal üçin $\alpha = 2{\cdot}10^{-7}\ Pa^{-1}$, $P_c = 7\ MPa$, $P_k = 10\ MPa$, onda $Q_{am}/Q^* = 0{,}72$ ýagny debit 28% azalýar.

16.4. Jaýrykly we jaýrykly-öýjükli sredalarda suwuklygyň we gazyň durnuksyz hereketi

Jaýrykly sredada durnuksyz filtrasion akymyň häsiýetnamalaryny hasaplamak üçin differensial deňlemeler ulgamlaryny başlangyç we ahyrky şertlerde integrirlemek gerek bolýar.

Goý, bize berlen bolsun: gowşak gysylýan we maýyşgak suwuklyk, ýagny $\rho = \rho_o[1 + \beta_S(P - P_o)]$; iki sredada – jaýryklar we öýjükli-jaýryklar, bloklar-maýyşgak, ýagny $m_i = m_{oi} + \beta_{si}(P - P_o)$, $(i = 1{,}2)$, iki sredanyň hem geçirijiligi hemişelik: $K_1 = const$, $K_2 = const$ jaýryklaryň we bloklaryň arasynda suwuklygyň çalşygy geçýär, bloklardan jaýryklara geçýän suwuklygyň massasy bolsa

$$g = \alpha_O \frac{\rho_O}{\mu}(P_2 - P_1),$$

gatnaşyga bagly. Şeýle ýagdaýda (4) deňlemeler ulgamy aşakdaky görnüşe eýe bolýar:

$$\frac{K_1}{\mu}\nabla^2 P_1 = \beta_1^* \frac{\partial P_1}{\partial t} - \frac{\alpha_0}{\mu}(P_2 - P_1)$$

$$\frac{K_2}{\mu}\nabla^2 P_2 = \beta_2^* \frac{\partial P_2}{\partial t} - \frac{\alpha_0}{\mu}(P_2 - P_1), \qquad \text{(XVI.33)}$$

bu ýerde P_1 we P_2 – jaýrykdaky we öýjükli blokdaky basyş;

$$\beta_1^* = \beta_{si} + m_{oi}\beta_s = 1,2,$$

bu ýerde β_1^*, β_2^* – jaýryklaryň we öýjükli bloklaryň maýyşgak (göwrümlilik) sygymynyň koeffisiýentleri (koeffisiýent uprugoýomkosti).

Aşakdaky bellikleri girizeliň:

$$\chi = \frac{K_1}{(\mu\beta_2^*)}, \qquad \varepsilon_1 = \frac{\beta_1^*}{\beta_2^*}, \qquad \varepsilon_2 = \frac{K_2}{K_1}, \qquad \tau = \frac{\mu\beta_2^*}{\alpha_0}. \qquad \text{(XVI.34)}$$

Şeýlelikde, (XVI.33) deňlemeler şu görnüşde ýazylar:

$$\chi\nabla^2 P_1 = \varepsilon_1 \frac{dP_1}{dt} - \frac{P_2 - P_1}{\tau},$$

$$\chi\nabla^2 P_2 = \frac{dP_2}{dt} + \frac{P_2 - P_1}{\tau}. \qquad \text{(XVI.35)}$$

Bu yerde pýezogeçirijilik koeffisiýenti χ jaýryklar ulgamynyň geçirijiligi – K_1 we bloklaryň maýyşgak sygymynyň – β_2^* üsti bilen hasaplanandygyny belläp geçeliň; parametr wagt bilen ölçenýär we gijikme wagty diýip atlandyrylýar. Bu parametr jaýrykly öýjükli sredada suwuklygyň durnuksyz hereketi teoriýasynda uly ähmiýeti bar; ol pýezogeçirijiligi – χ bolan öýjükli gatlak bilen deňeşdireniňde jaýrykly-öýjükli sredada basyşyň (bolünme) ýaýraýyş prosesiniň gijikmesini häsiýetlendirýär. Bu gijikme jaýrykly ulgamyň we bloklaryň öýjükli ulgamynyň arasyndaky suwuklygyň çalşygynyň barlygy bilen düşündirilýär.

Gijikme wagtyny τ başga görnüşde hem ýazyp bolýar:

$$\tau = \frac{\mu\beta_2^*}{\alpha_0} = \frac{\mu\beta_2^* l^2}{(\overline{\alpha} K_2)} = \frac{l^2}{(\overline{\alpha}\chi)}. \qquad \text{(XVI.36)}$$

Soňky aňlatmadan görnüşi ýaly gijikme wagtyň τ uly bahalary, bloklaryň pýezogeçirijiliginiň kiçi bahalaryna we bloklaryň ölçeginiň uly bahalaryna gabat gelýär.

(XVI.35) deňlemeler sistemasyny analizlesek, aşakdaky netijelere gelse bolar. Eger gijikme wagty $\tau = 0$ bolsa, onda $P_1 = P_2$ bolýar, ýagny jaýryklarda we bloklarda basyş birmeňzeş bolup ol sreda özüni birjynsly ýaly alyp barýar. Eger $\tau = \infty$ bolsa onda ulgam filtrasiýanyň iki deňlemesine bölünýär – jaýryklardaky we bloklardaky, ýagny bloklar izolirlenen bolýarlar we sreda sap jaýrykly ýaly özüni alyp barýar. τ bahasy aralyk bolan ýagdaýynda ol jaýrykly öýjükli sreda gabat gelýär.

(XVI.35) deňlemeler ulgamyny ýönekeýleşdirip bolýar, eger-de jaýryklyk koeffisiýenti m_1 we bloklaryň geçirijiligi K_2 kiçi bolan ýagdaýynda, ýagny $m_1 << m_2$, $K_2 << K_1$, onda $\varepsilon_1 << 1$, $\varepsilon_2 << 1$ we şol sebäpli $\varepsilon_1 \partial P_1/\partial t$ hem $\chi\varepsilon_2 \cdot \nabla^2 P_2$ goşulyjylary hasap etmän bolar.

Onda

$$\chi\nabla^2 P_1 + \frac{P_2 - P_1}{\tau} = 0; \qquad \frac{\partial P_2}{\partial t} + \frac{P_2 - P_1}{\tau} = 0. \qquad \text{(XVI.37)}$$

Edilen çaklama görä suwuklyk diňe bloklarda saklanyp ýerleşýändigini we diňe jaýryklar boýunça ýerini üýtgedýändigini aňladýar.

(XVI.35), (XVI.36) ulgamlar üçin differensial deňlemeleri integrirlemek we golaý getirme usuly bilen alnan dürli çözüwleri bar. Bu çözüwler çylşyrymly we uly bolany üçin bu ýerde görkezilmeýär. Gutarnyksyz gatlakda ýerleşen, hemişelik debitli Q, radiusy – r_c, bolan guýudan maýyşgak suwuklygyň alnyşy boýunça tekiz – radial meseläniň çözüwiniň netijesinde gurlan grafikleri mysal getireliň.

Başlangyç wagtda jaýryklardaky $P_1(r, 0)$ we bloklardaky $P_2(r, 0)$ basyşlar birmeňzeş we P_0-la deň bolýar. Şonuň ýaly basyş gatlagyň daşlaşdyrylan nokatlarynda hemişelik saklanyp galýar.

PEÝDALANYLAN EDEBIÝATLAR

1. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.

2. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. II tom. Aşgabat, 2009.

3. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, halky söýmek bagtdyr. Aşgabat, 2007.

4. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Türkmenistan – sagdynlygyň we ruhubelentligiň ýurdy. Aşgabat, 2007.

5. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň Ministrler Kabinetiniň göçme mejlisinde sözlän sözi. (2009-njy ýylyň 12-nji iýuny). Aşgabat, 2009.

6. Türkmenistanyň Prezidentiniň «Obalaryň, şäherleriň, etrapdaky şäherçeleriň we etrap merkezleriniň ilatynyň durmuş-ýaşaýyş şertlerini özgertmek boýunça 2020-nji ýyla çenli döwür üçin» Milli maksatnamasy. Aşgabat, 2007.

7. Türkmenistanyň Konstitusiýasy. Aşgabat, 2008.

8. «Türkmenistany ykdysady, syýasy we medeni taýdan ösdürmegiň 2020-nji ýyla çenli döwür üçin Baş ugry» Milli maksatnamasy. «Türkmenistan» gazeti, 2003-nji ýylyň, 27-nji awgusty.

9. «Türkmenistanyň nebitgaz senagatyny ösdürmegiň 2030-njy ýyla çenli döwür üçin maksatnamasy». Aşgabat, 2006.

10. *Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М.* Подземная гидравлика. М.: Недра, 1986.

11. *Кристеа Н.* Подземная гидравлика. М.:Гостоптехиздат, 1962.

12. *Маскет М.* Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.: Гостоптехиздат, 1949.

13. *Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г.* Подземная гидравлика. М.: Недра, 1973.

14. *Телков А.П.* Подземная гидрогазодинамика. Уфа, 1974.

15. *Чарный И.А.* Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963.

16. *Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б.* Подземная гидравлика. М.: Гостоптехиздат, 1949.

Mazmuny

Berdi Nurmämmedow

ÝERASTY GIDROGAZODINAMIKA

Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin
«Nebit-gaz känlerini özleşdirmek we ulanmak»,
«Nebit we gaz guýularyny burawlamak»,
«Nebit-gaz geologiýasy» hünärleri boýunça okuw kitaby

Redaktor *A. Aşyrowa*
Teh. redaktory *O. Nurýagdyýewa*
Surat redaktory *G. Orazmyradow*

Çap etmäge rugsat edildi 14.05.2012.
Möçberi 60x90 1/16. Ofset kagyzy. Edebi garniturasy. Ofset çap ediliş usuly.
Şertli çap listi 8,5. Şertli reňkli ottiski 9,51. Hasap-neşir listi 6,51.
Çap listi 8,5. Sargyt № 91. Sany 1000.

Türkmen döwlet neşirýat gullugy.
744004. Aşgabat, Garaşsyzlyk saýoly, 100.

Türkmen döwlet neşirýat gullugynyň
«Türkmenmetbugatüpjünçilik» maddy-tehniki üpjünçilik kärhanasy.
Ahal welaýaty, Ruhabat etraby, Ruhabat şäherçesi,
Gurbansoltan eje şaýoly, 2-nji jaý.